



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LOKALIZACE UVNITŘ BUDOV S VYUŽITÍM UWB SIGNÁLŮ

INDOOR POSITIONING SYSTEM USING UWB SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Simona Sadleková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Rozum

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Studentka: Simona Sadleková

ID: 174528

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace uvnitř budov s využitím UWB signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte princip trilaterace pro určení polohy bodu s neznámou polohou ze vzdáleností k bodům se známou polohou. Seznamte se s systémem Decawave TREK1000 a proveďte základní měření s předpřipraveným softwarem od společnosti Decawave. Umístěte tag do několika různých míst a zpracujte statistické vyhodnocení polohy tagu v každém místě. Vytvořte vlastní objektovou knihovnu pro komunikaci s TREK1000 přes Virtualní COM port v jazyce C#, tak aby byla snadno použitelná i v jiných projektech.

Ze zdrojových kódů předpřipravené aplikace zjistěte, jakým způsobem probíhá lokalizace a definujte úskalí použitého algoritmu. Obdobným způsobem proveďte odhad polohy tagu s využitím dat z dříve sestavené knihovny. Následně implementujte vylepšené lokalizační algoritmy např. pro zvýšení přesnosti nebo získání polohy za nepříznivých podmínek a porovnejte jejich parametry, např. přesnost nebo složitost. Implementujte lokalizaci do druhé knihovny, jež umožní výběr lokalizačního algoritmu a bude poskytovat polohu tagu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] decaWave, TREK1000 User Manual, decaWave [online]. [cit. 2019-15-05]. Dostupné z: <https://www.decawave.com/trek1000/usermanual/>
- [2] CANTÓN PATERNA, Vicente, Anna CALVERAS AUGÉ, Josep PARADELLS ASPAS a María PÉREZ BULLONES. A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. Sensors [online]. 2017, 17(12) [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.3390/s17122927. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2927>

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 27.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Rozum

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá lokalizáciou objektov predovšetkým vo vnútri budov s využitím UltraWide Band (UWB) signálov. Fyzickú vrstvu pre určovanie vzdialeností potrebných pre lokalizáciu tvoria čipy DW1000 v demonštračnom systéme TREK1000. Práca objasňuje princípy lokalizácie a prednosti UWB signálov v tejto oblasti. V praktickej časti je uskutočnené a vyhodnotené základné meranie s dodávaným demo programom k použitému lokalizačnému systému. Práca popisuje knižnicu pre komunikáciu so systémom TREK1000 v jazyku C#, čo umožní jednoduchšie použitie tohto systému v rôznych projektoch založených na .NET frameworku. Následne sa práca zaoberá knižnicou pre trilateráciu vytvorenou v jazyku C#, ktorá prináša novú metódu oproti pôvodnej funkcionalite a rieši problém pri zisťovaní polohy tagu v prípade, kedy sa sféry nepretínajú v jednom bode, ale v oblasti možných polôh.

Kľúčové slová

Lokalizácia, UWB signály, výpočet polohy, TREK1000, demo program

Abstract

This bachelor thesis deals with the indoor object localization by using Ultra Wide Band signals (UWB). Physical layer for determination of the distances, which are needed for localization, is built from DW 1000 integrated chips in demonstration system TREK1000. The thesis describes the library for communication with TREK1000 system in C# language, to enable intuitive application of this system in various projects based on .NET framework. Subsequently, the thesis deals with the trilateration implemented in C# language, which brings the new method compared to the original feature and solves the problem with finding the tag position in case the spheres are not crossed in one point, but in the area of possible appearance.

Keywords

Localization, UWB signals, position calculation, TREK1000, demo software

Bibliografická citácia:

SADLEKOVÁ, Simona. *Lokalizace uvnitř budov s využitím UWB signálů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134782>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Stanislav Rozum.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|-----------------------------------|---|
| Jméno a příjmení studenta: | <i>Simona Sadleková</i> |
| VUT ID studenta: | <i>174528</i> |
| Typ práce: | <i>Bakalářská práce</i> |
| Akademický rok: | <i>2020/21</i> |
| Téma závěrečné práce: | <i>Lokalizace uvnitř budov s využitím UWB signálů</i> |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2021

podpis autorky

Pod'akovanie

Týmto by som sa rada poďakovala môjmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Stanislavovi Rozumovi za odborné vedenie, trpezlivosť, zapožičanie vybavenia pre účely merania a všetky užitočné rady a návrhy k mojej práci.

V Brne dňa: 25. května 2021

.....
podpis autorky

Obsah

| | |
|--|-----------|
| ZOZNAM OBRÁZKOV | 9 |
| ZOZNAM TABULIEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| 1. TEORETICKÝ ÚVOD | 12 |
| 1.1 UWB – ULTRA WIDEBAND..... | 12 |
| 1.1.1 Štandard IEEE 802.15.4 (Low Rate WPAN)..... | 12 |
| 1.1.2 UWB signály | 14 |
| 1.1.3 Technológia UWB..... | 15 |
| 1.1.4 Pôsobenie šumu na UWB signály | 15 |
| 1.1.5 Prenos informácie vo viacerých kanáloch | 16 |
| 1.2 APLIKÁCIE A VYUŽITIE UWB..... | 17 |
| 1.2.1 Radarové zariadenia | 17 |
| 1.2.2 Zobrazovacie zariadenia..... | 17 |
| 1.2.3 Komunikačné zariadenia..... | 17 |
| 1.2.4 Uplatnenie v budúcnosti..... | 18 |
| 1.3 ROZDIEL MEDZI BLUETOOTH, WLAN A UWB..... | 18 |
| 1.3.1 Využitie technológie Bluetooth..... | 18 |
| 1.3.2 Využitie technológie WLAN | 19 |
| 1.4 PRINCÍP TRILATERÁCIE..... | 20 |
| 1.4.1 Trilaterácia v 2D priestore | 20 |
| 1.4.2 Trilaterácia v 3D priestore | 22 |
| 1.5 DECAWAVE TREK1000 | 22 |
| 1.5.1 DW1000 | 22 |
| 1.5.2 TREK1000 Vyhodnocovacia súprava | 24 |
| 1.6 KOMUNIKAČNÝ PROTOKOL TREK1000 | 25 |
| 2. MERANIE S DEMONŠTRAČNOU APLIKÁCIOU SYSTÉMU TREK1000..... | 27 |
| 2.1 MERANIE S TREK1000..... | 27 |
| 2.1.1 Postup merania | 27 |
| 2.1.2 Spracovanie údajov..... | 30 |
| 3. KNIŽNICA PRE KOMUNIKÁCIU S TREK1000 V C#..... | 37 |
| 3.1 VISUAL STUDIO | 37 |
| 3.2 FUNKCIA KNIŽNICE..... | 37 |
| 3.3 ŠTRUKTÚRA KNIŽNICE..... | 37 |
| 4. PREDPRIPRAVENÁ APLIKÁCIA..... | 39 |
| 4.1 DECARANGERTLS | 39 |
| 4.2 ALGORITMUS PRE VÝPOČET POLOHY TAGU | 39 |
| 5. NOVÁ METÓDA LOKALIZÁCIE..... | 42 |
| 5.1 VÁHOVÁ TRILATERÁCIA..... | 42 |
| 5.1.1 Implementácia metódy v 2D..... | 43 |
| 5.1.2 Implementácia metódy v 3D..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 6. KNIŽNICA PRE TRILATERÁCIU V C#..... | 46 |
| 6.1 FUNKCIA A ŠTRUKTÚRA KNIŽNICE..... | 46 |
| 6.2 TEST KNIŽNICE | 47 |
| ZÁVER | 49 |
| LITERATÚRA..... | 50 |
| ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK | 52 |
| ZOZNAM PRÍLOH..... | 53 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | | |
|------------|---|----|
| Obrázok 1 | UWB signál v porovnaní s inými rádiokomunikačnými systémami | 12 |
| Obrázok 2 | Vrstvy OSI modelu [2]..... | 13 |
| Obrázok 3 | Znázornenie šírky pásma UWB signálu [2] | 14 |
| Obrázok 4 | UWB signál v časovej a frekvenčnej oblasti..... | 15 |
| Obrázok 5 | Porovnanie šírky signálov [6] | 15 |
| Obrázok 6 | Porovnanie signálov v rušenom pásme [6] | 16 |
| Obrázok 7 | Multipath v bezdrôtových sieťach [1] | 16 |
| Obrázok 8 | WLAN v zašumenom pásme[6]..... | 19 |
| Obrázok 9 | Šírenie WLAN v čase [6]..... | 20 |
| Obrázok 10 | Princíp merania trilateráciou v 2D priestore | 21 |
| Obrázok 11 | Nepresnosť u trilaterácie..... | 21 |
| Obrázok 12 | Princíp merania trilateráciou v 3D priestore | 22 |
| Obrázok 13 | Metóda two-way ranging [10]..... | 23 |
| Obrázok 14 | Komunikačný protokol TREK1000 | 26 |
| Obrázok 15 | Rozmiestnenie kotiev a jednotlivé polohy tagu | 28 |
| Obrázok 16 | Záznam z programu | 29 |
| Obrázok 17 | Vývojový diagram | 30 |
| Obrázok 18 | Poloha tagu s najhoršou presnosťou lokalizácie (index polohy 0) | 30 |
| Obrázok 19 | Os y (index polohy 0), stredná hodnota (červeným) a histogram pre najhoršiu presnosť určenia polohy | 31 |
| Obrázok 20 | Poloha tagu so strednou presnosťou lokalizácie (index polohy 10) | 31 |
| Obrázok 21 | Os y (index polohy 10), stredná hodnota (červeným) a histogram pre strednú presnosť určenia polohy | 32 |
| Obrázok 22 | Poloha tagu s najlepšou presnosťou lokalizácie (index polohy 8) | 32 |
| Obrázok 23 | Os y (index polohy 8), stredná hodnota (červeným) a histogram pre polohu s najlepšou presnosťou určenia polohy | 33 |
| Obrázok 24 | Určovanie polohy mimo meráciu miestnosť | 36 |
| Obrázok 25 | Význam častí správy | 38 |
| Obrázok 26 | Príklad dekodovanej správy | 38 |
| Obrázok 27 | Príklad odhadu polohy priesečníka vo funkcii deca_3dlocate | 40 |
| Obrázok 28 | Možnosti, ktoré môžu nastať pri výpočte polohy tagu..... | 42 |
| Obrázok 29 | Kruhy sa pretínajú v oblasti [18]..... | 43 |
| Obrázok 30 | Prienik 2 sfér[19] | 44 |

ZOZNAM TABULIEK

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabuľka 1 | Nastavenie DIP switchov, 1 je vľavo, stav ON hore..... | 24 |
| Tabuľka 2 | Nastavenie DIP switchov pre kotvy..... | 27 |
| Tabuľka 3 | Nastavenie DIP switchov pre tag. | 28 |
| Tabuľka 4 | Pozície kotiev..... | 29 |
| Tabuľka 5 | Výsledky merania, u DecaRangeRTLS (x,y,z) ide o priemernú hodnotu | 34 |
| Tabuľka 6 | Vzdialenosť medzi skutočnou a zmeranou polohou (x,y,z - stredné hodnoty) | 35 |
| Tabuľka 7 | Porovnanie výsledkov výpočtu pomocou nového a pôvodného algoritmu | 47 |

ÚVOD

V súčasnosti sa od mnohých moderných elektronických zariadení vyžaduje určovanie polohy. Asi najtypickejším zástupcom sú smartfóny, ktoré pre externú lokalizáciu používajú technológiu GPS. Externá lokalizácia je už považovaná za samozrejmosť, no postupom času rastie potreba lokalizovať zariadenia aj v interiéri. Obrovských budov, ako sú masívne nákupné centrá, rozsiahle nemocničné komplexy, prípadne veľké administratívne budovy pribúda stále viac a najst' konkrétny obchod, ordináciu či kanceláriu môže mnohokrát znamenať neľahkú úlohu. Avšak navigačný systém v podaní GPS má jednu veľkú nevýhodu. Elektromagnetický signál, vysielaný družicami obyčajne neprejde v dostatočnej sile cez prekážky, akými sú strechy budov, steny a pod. Túto technológiu na lokalizáciu teda nie je možné používať v podzemí ani v budovách, pokiaľ nie je signál zachytávaný dostatočne blízko k oknu, pretože antény a čipy smartfónov skrátka nezachytia dostatočne silný signál [3]. V takom prípade musíme siahnuť po inej technológii, ako je WLAN, Bluetooth alebo UWB. Zariadení, využívajúcich vnútornú lokalizáciu, je celá škála a možnosti využitia tejto technológie sú široké, čo znamená, že sa dá očakávať rast celého segmentu [4]. Napr. Apple nedávno ako prvý integroval túto technológiu do iPhoneov 11 a 12, ktoré obsahujú nový špecializovaný čip U1 s technológiou UWB a spustil tým vlnu predstavovania nových spôsobov využitia tejto technológie [25].

Teoretická časť tejto práce je zameraná na popis UWB signálov, ich významu a využitia, následne je vysvetlený princíp trilaterácie pre určovanie polohy objektu s neznámou polohou zo vzdialeností k bodom so známou polohou. Na tomto princípe je založený aj systém na vyhodnotenie aktuálnej polohy TREK1000 od spoločnosti DecaWave [14], ktorý je v práci použitý najskôr s predpripravenými a neskôr s vlastnými algoritmami spracovania.

V praktickej časti je uskutočnené samotné meranie s predpripraveným softwarom od spoločnosti DecaWave [18], ktoré spočíva v umiestnení tagu na niekoľko rôznych miest a následnom spracovaní statického vyhodnotenia polohy tagu v každom mieste [14]. Následne je vytvorená vlastná objektová knižnica pre komunikáciu s TREK1000 cez virtuálny COM port v jazyku C#, ktorú bude možné použiť aj v iných projektoch. Ďalej sú analyzované zdrojové kódy predpripravenej aplikácie, konkrétne sekcia týkajúca sa lokalizácie a sú definované nedostatky tohto algoritmu spôsobujúce nepresnosť určenia polohy. V jazyku C# je následne vytvorená druhá knižnica, ktorá poskytuje výpočet polohy tagu pomocou pôvodného algoritmu. Nakoniec je táto knižnica rozšírená o vlastnú metódu lokalizácie, ktorá má za úlohu eliminovať definované nedostatky.

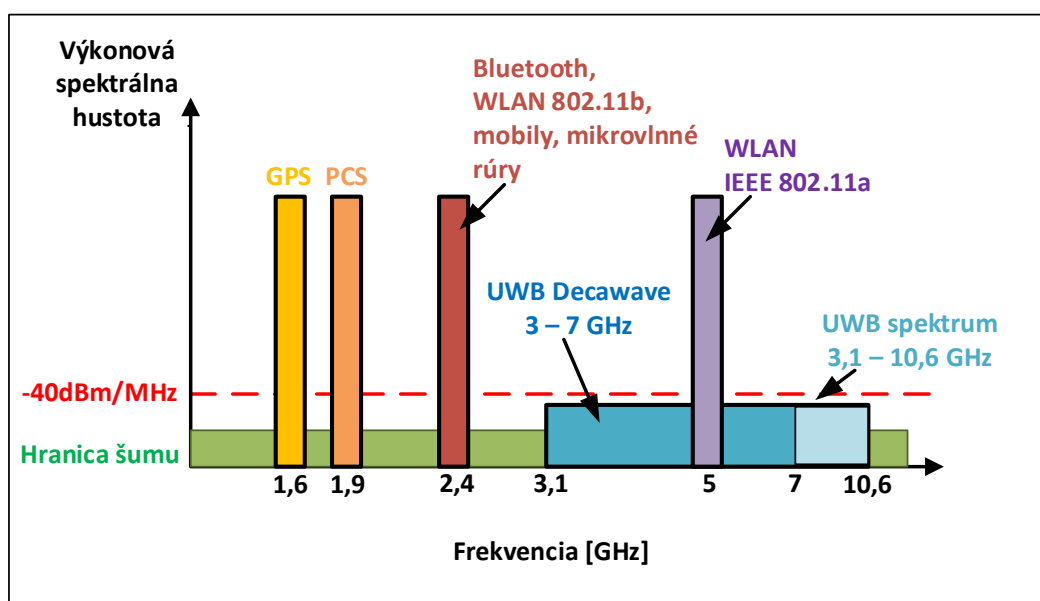
1. TEORETICKÝ ÚVOD

Táto kapitola sa zaoberá základnými teoretickými poznatkami o UWB (UltraWideBand) signáloch obecné a určovaní polohy princípom trilaterácie.

1.1 UWB – Ultra WideBand

Ultra WideBand je bezdrôtová technológia umožňujúca prenos dát s vysokou rýchlosťou, nízkym výkonom a na krátku vzdialenosť. Vyznačuje sa využívaním extrémne krátkych impulzov, pričom šírka pásma signálu presahuje 500 MHz. Dátová rýchlosť, nízka spotreba a vysoká kapacita kanála sú vlastnosti, vďaka ktorým je o túto technológiu záujem.

UWB sa začalo využívať najmä pre vojenské účely, predovšetkým pre radarové technológie, čím sa dostávame k ďalšej výhode tejto siete, a tou je vysoká bezpečnosť: prakticky nemožnosť odpočúvania či dokonca nemožnosť zistenia prítomnosti bezdrôtových zariadení v týchto sieťach (signály vypadajú ako slabý, normálny šum). Inak povedané, prístroje v UWB sieťach sa nerušia s ostatnými zariadeniami v elektromagnetickom spektre [1].

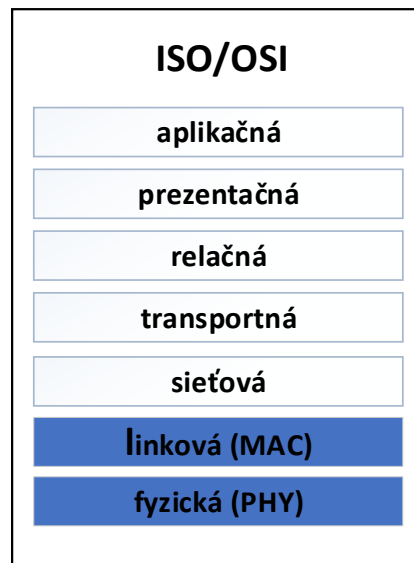


Obrázok 1 UWB signál v porovnaní s inými rádiokomunikačnými systémami

1.1.1 Štandard IEEE 802.15.4 (Low Rate WPAN)

Za účelom určovania polohy bol vytvorený LR-WPAN (Low-Rate-Wireless Personal Area Networks) – WPAN s nízkou rýchlosťou. Štandard IEEE 802.15.4 bol schválený v roku 2003. Vyznačuje sa, ako z názvu vyplýva, nízkou prenosovou rýchlosťou, veľmi dlhou výdržou batérie (mesiace alebo dokonca roky) a veľmi nízkou komplexnosťou. Norma definuje fyzickú vrstvu - PHY (vrstva 1), ktorá obsahuje prijímač s jeho ovládacími mechanizmami, ako aj vrstvu dátového spojenia - MAC (vrstva 2) modelu OSI, zabezpečujúcu prístup vyšších vrstiev k

fyzickej vrstve [2][4]. Na obrázku 2 sú znázornené jednotlivé vrstvy modelu OSI s vyznačenými vrstvami (modrou farbou), ktorými sa štandard zaoberá.



Obrázok 2 Vrstvy OSI modelu [2]

Určovanie polohy pomocou štandardu je založené na vysielaní a prijímaní dát fyzickou vrstvou, pričom pomocou MAC vrstvy je definovaný komunikačný protokol. Komunikácia vo fyzickej vrstve prebieha medzi uzlami, pričom sú prenášané tzv. PPDU, čo je hlavná dátová jednotka fyzickej vrstvy.

Tá obsahuje niekoľko blokov:

1. SHR: - 32-bitová preambula, ktorá slúži pre synchronizáciu prijímačov
2. SFD: - 8-bitový oddeľovač, definuje začiatok rámcov
3. PHR: - 8-bitová PHY hlavička, definuje dĺžku rámca
4. PSDU: - nesie informáciu o cieľovom uzle.

MAC vrstva následne tvorí a synchronizuje jednotlivé rámce a tiež zabezpečuje spoľahlivé spojenie dvoch zariadení na tejto vrstve [4].

Postupom času bolo vytvorených viacero inovácií tohto štandardu [5]:

IEEE 802.15.4a – WPAN Alternatívna nízka sadzba PHY

IEEE 802.15.4a-2007 je zmena a doplnenie predošlej verzie. Cieľom bolo dosiahnutie vyššej presnosti určovania rozsahu a lokalizácie (presnosť 1 m a lepšia), vyššej priepustnosti agregátov, zvýšenie škálovateľnosti agregátov, väčší dosah a nižšia spotreba energie a náklady.

IEEE 802.15.4b – Revízia a vylepšenie

IEEE 802.15.4c – PHY Pozmeňujúci a dopĺňujúci návrh pre Čínu

IEEE 802.15.4d – PHY a MAC Zmena pre Japonsko

IEEE 802.15.4e – Zmena pre doplnenie MAC pre priemyselné aplikácie

1.1.2 UWB signály

Pre UWB signály je charakteristická veľmi veľká šírka pásma, omnoho väčšia, ako u úzkopásmových technológií. Na definíciu UWB signálu je nutné zaviesť pojem absolútna šírka pásma BW_{-10dB} signálu pre pokles o 10 dB, ktorá je znázornená na obrázku 3 a definovaná rovnicou (1)[2]:

$$BW_{-10dB} = f_{MAX} - f_{MIN} \quad (1)$$

A relatívna šírka pásma B_{rel} , ktorá je definovaná rovnicou (2)[2]:

$$B_{rel} = \frac{BW_{-10dB}}{f_c} \quad (2)$$

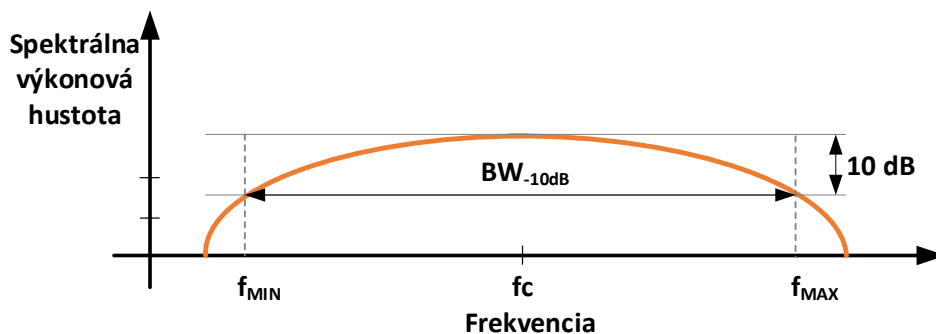
Kde f_c je stredná frekvencia a je daná vzťahom (3)[2]:

$$f_c = \frac{f_{MAX} + f_{MIN}}{2} \quad (3)$$

Z uvedených vzťahov vyplýva, že relatívnu šírku pásma môžeme vyjadriť iba pomocou frekvencií f_{MAX} a f_{MIN} (4)[2]:

$$B_{rel} = \frac{2 \cdot (f_{MAX} - f_{MIN})}{f_{MAX} + f_{MIN}} \quad (4)$$

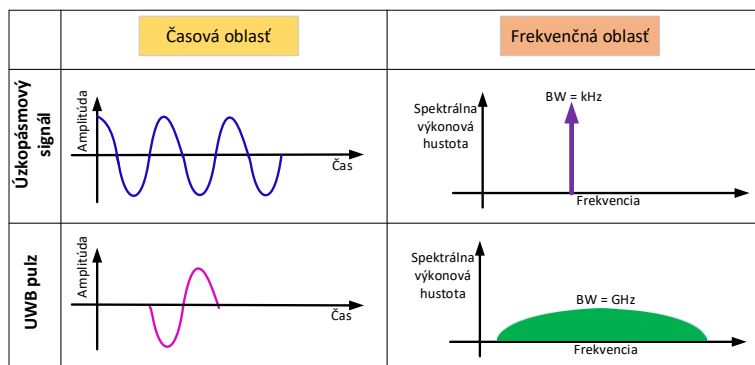
V prípade, že je stredná frekvencia f_c väčšia ako 2,5 GHz, každý signál s absolútnou šírkou pásma pre pokles o 10 dB BW_{-10dB} väčšou ako 500MHz je považovaný za UWB. Ak je stredná frekvencia f_c menšia ako 2,5 GHz, musí mať signál relatívnu šírku pásma väčšiu ako 0,2 MHz, aby spadol do kategórie UWB signálov [2].



Obrázok 3 Znázornenie šírky pásma UWB signálu [2]

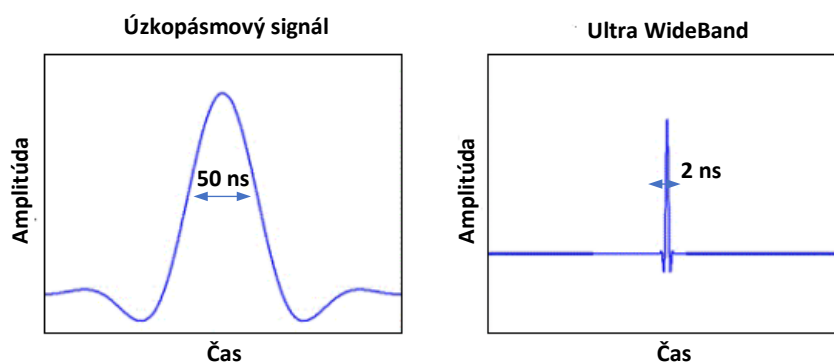
1.1.3 Technológia UWB

Technológia UWB je založená na využívaní veľmi krátkych širokopásmových signálov (parametre impulzu sa snažia blížiť k Diracovmu impulzu) [1], ako je znázornené na obrázku 4.



Obrázok 4 UWB signál v časovej a frekvenčnej oblasti

Malá dĺžka signálu znamená tiež väčšiu rýchlosť náběžnej a zostupnej hrany a tým aj zjednodušenie merania času začiatku a konca signálu. Na základe týchto impulzov sme schopní zmerať vzdialenosť dvoch bodov presnejšie než u úzkopásmových signálov [6], ako ukazuje obrázok 5.



Obrázok 5 Porovnanie šírky signálov [6]

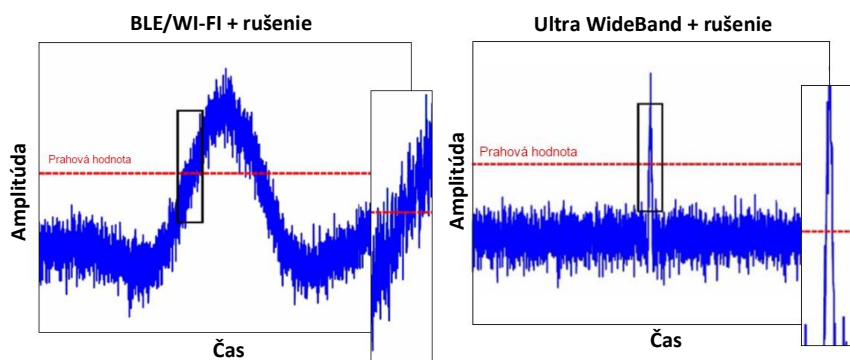
1.1.4 Pôsobenie šumu na UWB signály

Jednou z vlastností UWB signálov je aj pomerne vysoká odolnosť voči rušeniu.

Úzkopásmové signály sú veľmi citlivé na rušenie, ktoré u nich spôsobuje značné skreslenie, prípadne znehodnotenie a stratu nameraných údajov. Vďaka pomaly stúpajúcej hrane je veľmi ťažké odhadnúť čas, kedy signál prekročí prahovú hodnotu použitú na meranie času letu signálu [6].

Na rozdiel od úzkopásmových signálov, u UWB signálov, vďaka svojej rýchlosti nástupnej hrany, môžeme celkom presne určiť dobu, kedy signál prekročil danú prahovú hodnotu a čas letu signálu zmerať presnejšie, pričom sa jedná sa o rádové zlepšenie presnosti [6].

Na obrázku 6 je porovnanie úzkopásmového a UWB signálu v rušenom pásme. U UWB je vidieť veľmi efektívnu odolnosť voči bielemu šumu.

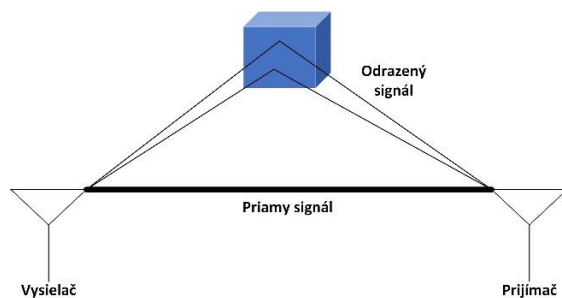


Obrázok 6 Porovnanie signálov v rušenom pásme [6]

1.1.5 Prenos informácie vo viacerých kanáloch

V bezdrôtových komunikačných kanáloch sa objavuje fenomén známy ako multipath. Je spôsobený odrazmi prenášaného signálu z rôznych povrchov, ako sú budovy, stromy a ľudia [9].

Na obrázku 7 je znázornené, že signál nemusí byť vysielaný smerom z vysielacza do prijímača len jednou, priamou cestou, ale hneď niekoľkými. U úzkopásmových signálov môže tento jav vplyvom súčtu rôzne oneskorených reprezentácií signálu spôsobiť degradáciu tohto signálu až do -40dB [1].



Obrázok 7 Multipath v bezdrôtových sieťach [1]

UWB signály sú zložené z veľmi krátkych impulzov (kratších, než je rozdiel doby šírenia v priamej a odrazenej ceste), čo umožňuje rozlíšenie odrazených signálov a to ich robí menej citlivými na viacestný efekt. Odrazený impulz má tak mimoriadne krátke okno, v ktorom sa môže stretnúť s priamym pulzom a spôsobiť degradáciu signálu [1].

Napriek tomu nie je komunikácia UWB úplne odolná voči viacestnému skresleniu. Vo vnútorných kanáloch, kde je veľké množstvo objektov a rozptyľovače sú blízko seba, môže nastať u impulzov UWB s nízkym výkonom výrazne skreslenie [1].

1.2 Aplikácie a využitie UWB

FCC [7] kategorizuje aplikácie UWB ako radarové, zobrazovacie alebo komunikačné zariadenia.

1.2.1 Radarové zariadenia

Radar je považovaný za jednu z najvýkonnejších aplikácií technológie UWB. Umožňuje to jemná polohovacia charakteristika úzkych UWB impulzov [1].

Vďaka svojmu veľmi širokému frekvenčnému spektru môžu signály UWB prenikať rôznymi prekážkami. Táto vlastnosť je využívaná najmä u radaru GPR (Ground – Penetrating Radar), ktorý je užitočným prostriedkom pri rôznych druhoch prírodných katastrof, ako je zemetrasenie, Tsunami, tornádo a pod. a pomáha zachraňovať ľudské životy v troskách budov, zasiahnutých takouto katastrofou [1].

S takýmto typom radarových systémov sa môžeme stretnúť aj v stavebnom sektore, napr. na lokalizáciu potrubí, svorníkov a elektrického vedenia [1].

Rovnaká technológia podľa rôznych predpisov môže byť použitá aj pre rôzne typy lekárskeho zobrazovacích systémov, ako sú systémy na monitorovanie srdca na diaľku [1].

UWB radar sa používa tiež v automobilovom priemysle na systémy predchádzania zrážkam [1].

Samozrejme, ako už bolo spomenuté v kapitole 1.1, veľmi nízky prenosový výkon týchto signálov ich predurčuje ako ideálnych kandidátov na tajné vojenské komunikácie. Impulzy UWB je extrémne ťažké odhaliť alebo zachytiť, preto neoprávnené strany nezískajú prístup k bezpečným vojenským informáciám [1].

1.2.2 Zobrazovacie zariadenia

Malé a lacné transceivery UWB sú výborne využiteľné pre bezdrôtové senzorové sieťové aplikácie pre vojenské aj civilné účely. Takéto senzorové siete sa používajú na detekciu fyzikálneho javu v neprístupnej oblasti a prenášajú informácie do cieľa. Vojsko by tak mohlo pomocou detekcie jednotlivých vojakov sledovať nepriateľa na bojisku [1].

Civilné aplikácie môžu zahŕňať pozorovanie životného prostredia, monitorovanie zdravia, sledovanie väzňov alebo zásob, automatizáciu domácnosti a pod [1].

1.2.3 Komunikačné zariadenia

Technológia UWB sa v posledných rokoch začína objavovať v nových mobilných telefónoch. Zatiaľ táto technológia nemá mnoho uplatnení, ale predpokladá sa, že v budúcnosti bude pre nás jej použitie rovnako samozrejmé ako Bluetooth. Každý výrobca predstavuje iný spôsob využitia tejto technológie. Apple prináša novinky v oblasti prenosu súborov – presné a rýchle zdieľanie. Čip U1

taktiež dokáže vyhľadať druhý telefón, s ktorým chceme súbory zdieľať. Samsung vo svojich mobilných telefónoch s čipom U1 ponúka vylepšenie funkcie na zdieľanie medzi dvomi telefónmi a dokáže nájsť polohu druhého zariadenia, ktoré sa stratilo. Takže pokiaľ bude v budúcnosti UWB aj v kľúčoch, slúchadlách a pod., bude ich možné pomocou tejto funkcie nájsť. Spoločnosť Xiaomi ukázala využitie v oblasti inteligentných domácností. Po namierení mobilu s UWB na lampičku, televízor, klimatizáciu a ďalšiu elektroniku v domácnosti bude možné tieto zariadenia diaľkovo ovládať. Spoločnosť NXP predstavuje využitie tejto technológie v automobiloch, konkrétne bezpečnejšie bezkľúčové odomykanie, presná lokalizácia auta v podzemnom parkovisku, platenie bez sťahovania okna, otváranie garážových dvier pri príjazde [8].

1.2.4 Uplatnenie v budúcnosti

V budúcnosti sa predpokladá uplatnenie v oblasti bezkontaktného platenia či navigácie v obchodoch, v rámci inteligentných domácností sa predpokladá, že nahradí kľúče od domu alebo napríklad pomocou telefónu alebo hodinek bude možné odomykať počítač. Keďže technológia UWB ponúka použitie aj v režime vysokej rýchlosti s prenosovou kapacitou v rádoch Gb/s, mohla by to tiež byť vhodná technológia pre dlho očakávané okuliare pre virtuálnu realitu [8].

1.3 Rozdiel medzi Bluetooth, WLAN a UWB

Inžinieri, ktorí vyvíjajú zariadenia s funkciou vnútornej lokalizácie majú neľahkú úlohu, ktorá spočíva vo výbere správnej technológie. Využiť WLAN alebo Bluetooth vzhľadom k ich rozšírenosti, alebo zvoliť UWB?

1.3.1 Využitie technológie Bluetooth

Technológia Bluetooth používa ako parameter na meranie vzdialenosti silu signálu. Sila signálu je však veľmi nepresným parametrom. Pokles amplitúdy signálu totiž nemusí nutne znamenať predĺženie vzdialenosti. Napríklad v prípade, keď medzi vysielateľ a prijímač postavíme betónový stĺp, dôjde k značnému poklesu signálu, no vzdialenosť sa pritom nezmenila, čo značí celkom veľký problém [6].

Tento problém má isté riešenie – mapovanie priestoru - kedy vysielateľ umiestnime na presne dané pozície v objekte a zmeriame presnú úroveň signálu, čím dostaneme referenčnú úroveň signálu. Následne sa pri zisťovaní polohy porovnáva nameraná hodnota s referenčnou, pričom sa za súčasnú pozíciu považuje tá, ktorá sa najviac zhoduje s referenčnou hodnotou. Nevýhodou je fakt, že pokiaľ sa zmení priestor, v ktorom chceme vzdialenosť merať, musíme priestor mapovať znovu [6].

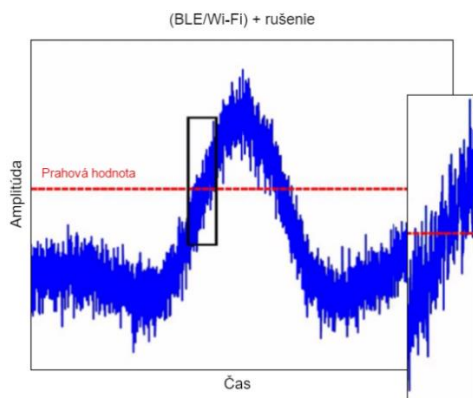
Algoritmov pre mapovanie je mnoho, ale je dôležité si uvedomiť, že sa jedná len o možné riešenie odstránenia problému, ktorý pri meraní vzdialenosti pomocou technológie Bluetooth vzniká [6].

1.3.2 Využitie technológie WLAN

WLAN je bezdrôtová počítačová sieť, založená prevažne na štandardoch IEEE 802.11, známych pod názvom Wi-Fi.

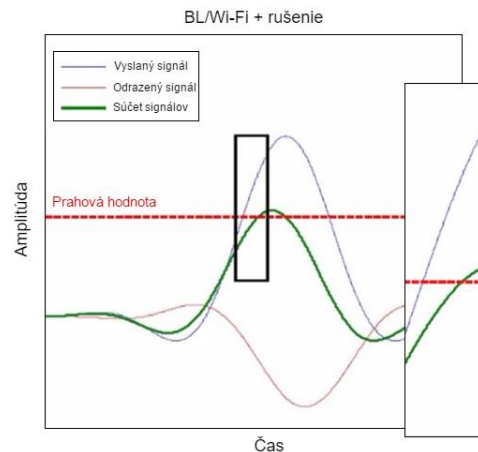
Predstavuje nepopierateľne najrozšírenejšiu technológiu na vnútornú lokalizáciu mobilných telefónov s operačným systémom Android.

Určovanie polohy pomocou WLAN má podobný postup ako technológia Bluetooth, z čoho vyplývajú úplne rovnaké nedostatky. U technológie WLAN je to ale o trochu zložitejšie. U úzkopásmového WLAN signálu s rušením je totiž veľmi ťažké zmerať presnú amplitúdu z dôvodu sínusového kolísania signálu a odchýlok spôsobených vonkajším rušením, čo so sebou prináša úskalia v podobe nepresného merania v reálnom prostredí. Na obrázku 8 je znázornené, ako ťažké je zmerať presnú amplitúdu WLAN signálu [6].



Obrázok 8 WLAN v zašumenom pásme[6]

Nie je to však jediný dôvod, prečo je meranie pomocou WLAN nepresné. Ďalším faktorom, ktorý v danej problematike hrá svoju nepopierateľnú rolu je fakt, že signál sa môže šíriť k cieľu niekoľkými spôsobmi, čím dochádza k jeho oneskoreniu. Samotný obsah dát pritom nie je poškodený, ale určiť presný čas takéhoto signálu a jeho amplitúdu je takmer nemožné, čo je zjavné z obrázku 9 [6].



Obrázok 9 Šírenie WLAN v čase [6]

1.4 Princíp trilaterácie

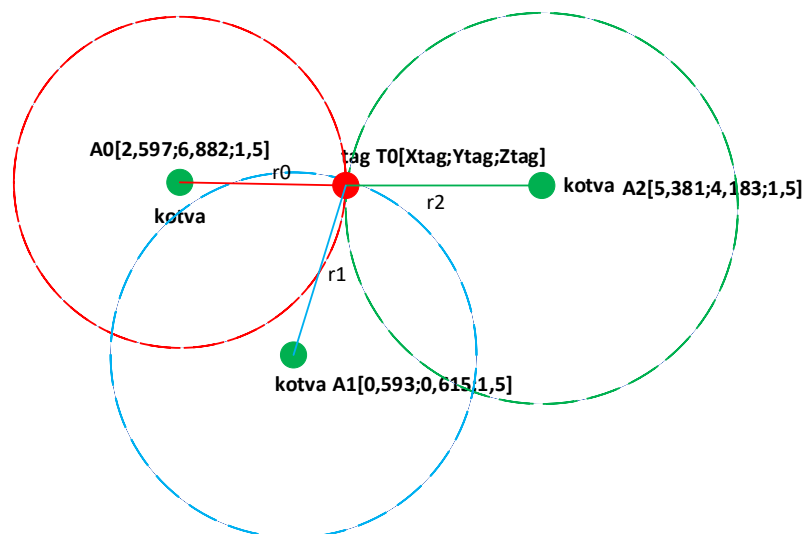
Trilaterácia je metóda pre určovanie pozície objektov pomocou vzdialeností od bodov so známou pozíciou. Princíp metódy spočíva v určovaní zmien vzdialenosti medzi pevnými a pozorovanými bodmi vzhľadom k nulej pozícii.

1.4.1 Trilaterácia v 2D priestore

Meranie sa vykonáva najlepšie z troch pevných bodov, vid' obrázok 10. Z pevných bodov, ktoré slúžia ako stanovisko pre prístroj sa merajú vzdialenosti k pozorovaným bodom.

Pomocou tejto metódy sú lokalizované objekty aj vyhodnocovacou súpravou TREK1000, s ktorou bude uskutočnené meranie. Používajú sa na to 3 pevné vysielace (kotvy) a 1 pohyblivý (tag). Tag zistí vzdialenosti od jednotlivých kotiev a táto vzdialenosť je polomerom pomyslenej kružnice okolo každej kotvy. Poloha tagu je určená na základe priesečníku týchto troch kružníc, ako je názorne ukázané aj na obrázku 10.

Keďže polohu bodu určuje prienik 3 kružníc, dá sa spočítať pozícia X, Y, Z vzhľadom k počiatku súradnicovej sústavy, a to pomocou sústavy rovníc pre kružnice (5).



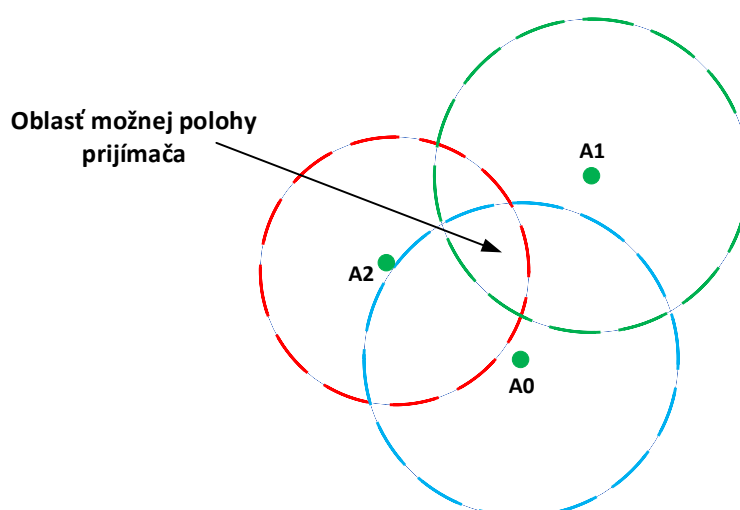
Obrázok 10 Princíp merania trilateráciou v 2D priestore

Sústava rovníc bude potom vypadáť nasledovne (5)[10][9]:

$$\begin{aligned} r0^2 &= (X_{A0} - X_{tag})^2 + (Y_{A0} - Y_{tag})^2 + (Z_{A0} - Z_{tag})^2 \\ r1^2 &= (X_{A1} - X_{tag})^2 + (Y_{A1} - Y_{tag})^2 + (Z_{A1} - Z_{tag})^2 \\ r2^2 &= (X_{A2} - X_{tag})^2 + (Y_{A2} - Y_{tag})^2 + (Z_{A2} - Z_{tag})^2, \end{aligned} \quad (5)$$

kde $r0$, $r1$ a $r2$ [m] sú vzdialenosti medzi tagom a kotvami, X_{A0} až Z_{A3} sú vzdialenosti kotiev od počiatku súradnicovej sústavy a X_{tag} , Y_{tag} a Z_{tag} je poloha tagu.

Vzhľadom k nepresnostiam (spôsobeným rušením signálu počas prenosu) môže nastať situácia, že sa kružnice nepretnú v jednom bode, ako ukazuje aj obrázok 11.



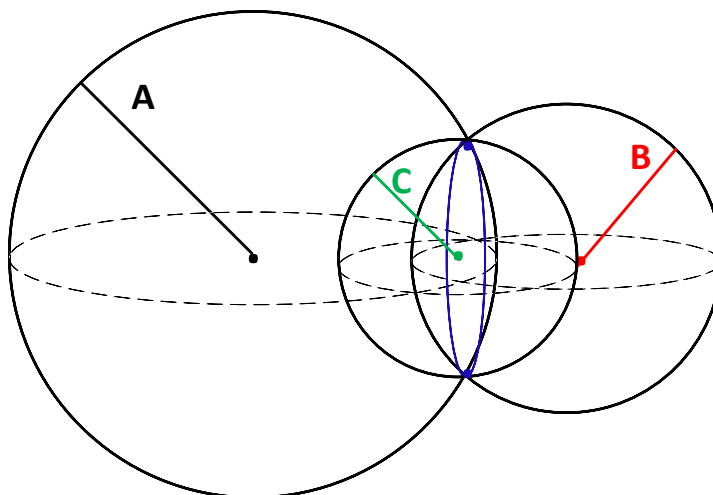
Obrázok 11 Nepresnosť u trilaterácie

Vznikne tak malá oblasť, v ktorej sa pozícia môže určiť viacerými algoritmami. Najčastejšie používané sú napr. metóda najmenších štvorcov alebo metóda najbližšieho suseda [11].

1.4.2 Trilaterácia v 3D priestore

Rovnaký princíp funguje aj v trojrozmernom priestore, až na to, že namiesto kružníc uvažujeme plochy gúľ.

Pre jednoznačné určenie bodu v 3D priestore sú potrebné 4 kotvy. Dôvodom pridania ďalšej kotvy je fakt, že pokiaľ by meranie bolo uskutočnené len s 3 kotvami, nastane situácia, kedy na ose Z budú výsledkom merania 2 polohy, pretože prienikom 3 gúľ je kružnica a tá sa pretne s plochami gúľ v 2 bodoch, ako ukazuje obrázok 12. Umiestnením štvrtej kotvy na ose Z sa tento problém vyrieši [10].



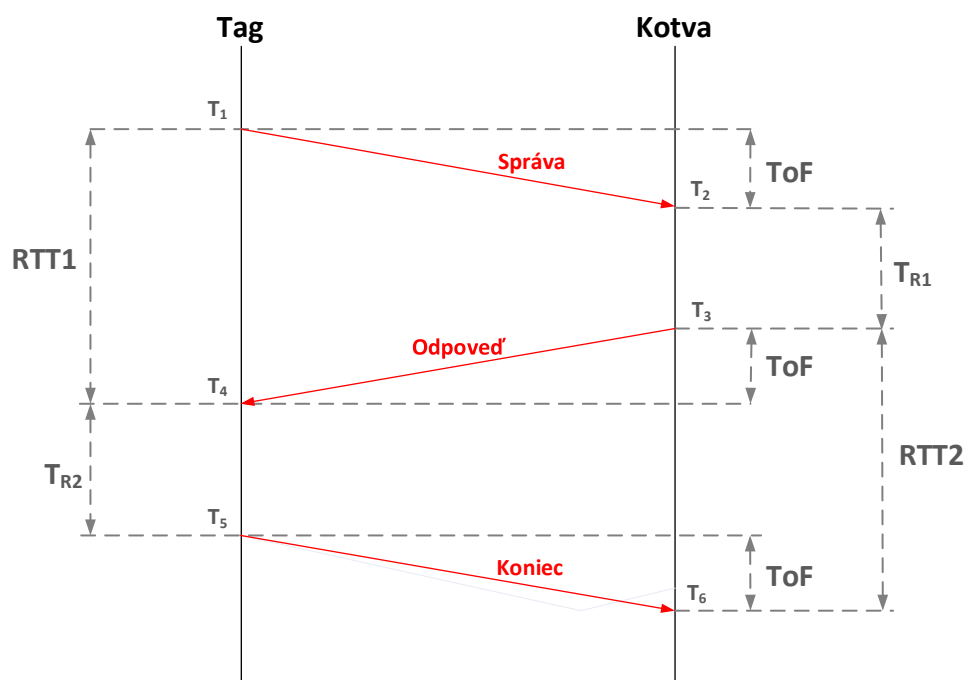
Obrázok 12 Princíp merania trilateráciou v 3D priestore

1.5 DecaWave TREK1000

Írska spoločnosť DecaWave vyvíja integrované obvody, softvér, moduly a referenčné návrhy, vďaka ktorým je možné určiť presnú lokalizáciu v reálnom čase. Ich nová bezdrôtová technológia UWB priniesla úplne novú triedu ľahko implementovateľných, vysoko bezpečných a inteligentných lokalizačných funkcií, internetových služieb a inteligentné spotrebiteľské produkty a aplikácie [12].

1.5.1 DW1000

Čip DW1000 umožňuje lokalizáciu metódou two-way-ranging (TWR) s presnosťou 10 cm. Technika TWR je založená na obojsmernej komunikácii medzi tagom a jednotlivými kotvami. Princíp metódy je znázornený na obrázku 13.



Obrázok 13 Metóda two-way ranging [10]

Tag iniciuje komunikáciu vyslaním prvej správy v čase T_1 . Kotva po určitej dobe (T_{R1}) odpovie správou obsahujúcou informácie o časových okamihoch prijatia správy (T_2) a odoslania odpovede na správu (T_3). Tag prijme odpoveď v čase T_4 a následne v čase T_5 pošle ukončujúcu správu, ktorá obsahuje informácie o zmeranej dobe $RTT1$ a T_{R2} . Pomocou týchto časov a časov zmeraných na strane kotvy ($RTT2$ a T_{R1}) je možné vypočítať dobu ToF , ktorá sa používa na odhad vzdialenosti medzi tagom a kotvou (za predpokladu, že je známa rýchlosť šírenia) podľa vzťahu (6)[10]:

$$ToF = \frac{RTT1 - T_{R1} + RTT2 - T_{R2}}{4} \quad (6)$$

Podmienku pre rovnaké časy odpovedí nie je vždy jednoduché dosiahnuť a mohla by byť obmedzujúca. Preto DW1000 používa pre odhad vzdialeností asymetrickú metódu TWR. Topológia je rovnaká ako u symetrickej, ale výpočtový vzťah prechádza na (7)[10]:

$$ToF = \frac{RTT1 \cdot RTT2 - T_{R1} \cdot T_{R2}}{RTT1 + RTT2 + T_{R1} + T_{R2}} \quad (7)$$

Táto metóda má tiež niekoľko výhod a nevýhod:

Výhody:

- Kotvy nemusia byť synchronizované

Nevýhody:

- Vyššia spotreba energie
- Zložitejšia implementácia (napr. výber najlepšej sady kotiev)
- Na lokalizáciu je potrebných viac správ

1.5.2 TREK1000 Vyhodnocovacia súprava

V tejto práci bolo prevedené meranie s TREK1000. Táto vyhodnocovacia súprava sa skladá z jednotiek EVB1000, ktoré sa skladajú z vysieláčov s čipom DW1000 a mikrokontroléra STM pre riadenie a komunikáciu od firmy DecaWave. Tieto vysieláče pracujú v pásme od 3,5 GHz do 6,5 GHz, v ktorom je rozložených 6 kanálov. Kanály 1, 2, 3 a 5 sa vyznačujú šírkou pásma 500 MHz a kanály 4 a 7 šírkou pásma 900 MHz. Vysieláče môžu byť statické (so známou polohou) alebo pohyblivé (s neznámou polohou). Táto súprava obsahuje statické vysieláče, tzv. kotvy (Anchors) a pohyblivé vysieláče, tzv. tagy (Tags). Umožňuje tiež voľbu 2 prenosových rýchlostí – 110kbit/s a 6,8Mbit/s [10].

Možnosti nastavenia DIP switchov jednotiek sú uvedené v tabuľke 1 [10]:

Tabuľka 1 Nastavenie DIP switchov, 1 je vľavo, stav ON hore

| Pozícia | Funkcia | Popis |
|---------|-------------|---|
| 1 | Rezervované | Vždy v stave ON |
| 2 | MODE | ON: Prenosová rýchlosť = 6,8Mbit/s OFF: Prenosová rýchlosť = 110kbit/s |
| 3 | CHANNEL | ON: kanál 5 (f = 6,5 GHz) OFF: kanál 2 (f = 4 GHz) |
| 4 | UNIT | ON: kotva OFF: tag |
| 5 | UNIT_ID[2] | Nastavenie 3-bitového ID jednotky (tag alebo kotva) |
| 6 | UNIT_ID[1] | |
| 7 | UNIT_ID[0] | |
| 8 | Rezervované | Vždy v stave OFF |

Vzorkovanie prebieha hneď po zapnutí jednotky, takže je nutné nastaviť jednotku ešte pred zapnutím.

Súprava potom umožňuje rýchlo vyhodnotiť polohu pomocou metódy trilaterácie vo viacerých prípadoch použitia programu DecaRangeRTLS.

TREK1000 môže pracovať v 1 z 3 topológií [10]:

1. **Trecking (sledovanie)**
2. Geo – Fencing (SecureBubble)
3. Navigátion (navigácia)

V tejto práci sa bude táto vyhodnocovacia súprava používať na sledovanie. Táto topológia sa používa v prípadoch, ako je sledovanie majetku, lokalizácia osôb vnútri budov, logistika a automatizácia výroby. V tejto konfigurácii je možné zbierať 2D alebo 3D polohu vzhľadom na polohu kotvy.

Z teórie určovania polohy trilateráciou vyplýva, že pre 2D lokalizáciu sú potrebné 3 kotvy. V tom prípade ale môže nastať situácia, že výsledkom lokalizácie budú 2 polohy na ose Z. Systém vtedy vyberie tú s menšou hodnotou. Preto je pre 3D lokalizáciu nutné použiť ešte 4. kotvu, ktorá bude umiestnená v inej výške na ose Z [10].

1.6 Komunikačný protokol TREK1000

Systém TREK1000 obsahuje mikrokontrolér STM32F105RCT6 od STMicroelectronics, ktorý vytvára virtuálny sériový port [13]. Pomocou tohto rozhrania je možné s týmto systémom komunikovať, a to prostredníctvom spojenia SPI a spracovávať obsah prijatých údajov. Mikrokontrolér disponuje tromi SPI, vďaka ktorým umožňuje rýchlosť prenosu dát až 18 Mb/s a to jak v duplexnom, tak simplexnom režime. 3-bitový delič ponúka 8 hlavných frekvencií a rámec je konfigurovateľný na 8 alebo 16 bitov [14].

Obzvlášť dôležitá je schopnosť presne zmerať čas od odoslania signálu po prijatie odpovede. Táto funkcia umožňuje určiť vzdialenosť medzi jednotlivými vysielacími.

Spôsob komunikácie je založený na multiplexovaní s časovým delením (TDM). Výmena správ sa uskutočňuje medzi každou jednotkou osobitne. Komunikácia začína tým, že tag vysielá vysielací rámec všetkým kotvám v dosahu. Potom každá z nich odpovie v konkrétnom okamihu, v poradí podľa adresy jednotky. Rámčeky odozvy obsahujú vzdialenosť od danej kotvy, ktorá je vypočítaná vzhľadom k predchádzajúcej relácii. To znamená, že prijaté merania budú vždy oneskorené o dobu trvania rámca. Nakoniec tag pošle odpoveď, do ktorej umiestni časy prijímania rámcov odozvy od každej z kotiev [15]. Na obrázku 14 je znázornený komunikačný protokol medzi tagom a jednotlivými kotvami systému TREK1000.

Správa prijatá cez COM port

109 114 32 48 70 32 48 48 48 48 48 53 97 52 32 48 48 48 48 48 52 99 56 32 48 48 48 48 48 52 51 54 32 48 48 48 48 48 51 102 57 32...
 ...48 57 53 56 32 52 48 52 50 52 48 52 50 32 97 48 58 48 32 13 10

Prevod podľa ASCII tabuľky

m r 0 f 0 0 0 0 0 5 a 4 0 0 0 0 0 4 c 8 0 0 0 0 0 4 3 6 0 0 0 0 0 3 f 9 0 9 5 8 4 0 4 2 4 0 4 2 a0:0 <CR><LF>

Prevod do hex.tvaru

| | | | | | | | | | | |
|--|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-------------------|-----------------------------|
| mr | 0x0f | 0x000005a4 | 0x000004c8 | 0x00000436 | 0x000003f9 | 0x0958 | 0xc0 | 0x40424042 | a0:0 | <CR><LF> |
| Typ správy (raw(neopravená)/(correct(opravená))) | Maska, určujúca, ktoré vzdialenosti sú platné | Vzdialenosť tagu od kotvy s ID 0 | Vzdialenosť tagu od kotvy s ID 1 | Vzdialenosť tagu od kotvy s ID 2 | Vzdialenosť tagu od kotvy s ID 3 | Celkový počet prijatých vzdialeností | Poradové číslo zmeranej vzdialenosti | Čas poslednej prichodzej správy o vzdialenosti | aID_tagu:ID_kotvy | Nový riadok |

Obrázok 14 Komunikačný protokol TREK1000

2. MERANIE S DEMONŠTRAČNOU APLIKÁCIOU SYSTÉMU TREK1000

Táto kapitola sa venuje meraniu so systémom TREK1000 pomocou programu DecaRngeRTLS.

2.1 Meranie s TREK1000

Tracking mód používa na meranie 3 kotvy a 1 tag, pričom jedna z kotiev je pripojená pomocou USB k počítaču. V počítači je pripravený program DecaRangeRTLS, pomocou ktorého sa nahráva približne minútový záznam s informáciami o polohách kotiev voči miestu [0;0], tagu voči jednotlivým kotvám, tagu voči miestu [0;0] a presnom čase, v ktorom sa meranie uskutočnilo [10].

2.1.1 Postup merania

Meranie bolo prevedené v priestoroch miestnosti SE6.109 na Ústave Radioelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií Vysokého učení technického v Brně.

Prvým krokom je v tomto meraní nastavenie jednotiek. Ako už bolo spomenuté, pre toto meranie budeme potrebovať 3 kotvy a 1 tag.

V prípade nášho merania boli použité 3 kotvy a 1 tag. Nastavenie kotiev bolo nasledujúce: UNIT: ON (kotva) s ID 0 až 2 a tagu: UNIT: OFF (tag) s ID 0. Prenosová rýchlosť bola zvolená 6,8Mbit/s, kanál 2 (frekvencia 4 GHz), ako to ukazuje tabuľka 2 a 3.

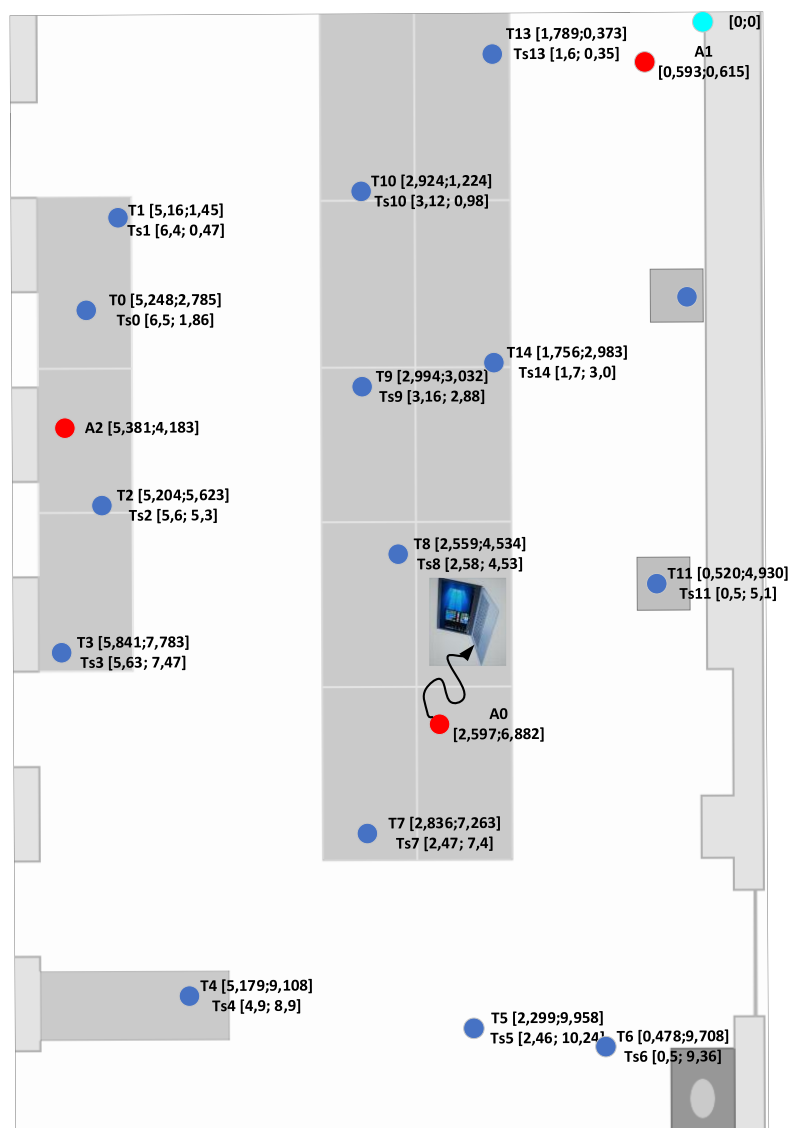
Tabuľka 2 Nastavenie DIP switchov pre kotvy.

| Pozícia | Funkcia | Popis |
|---------|-------------|----------------------------------|
| 1 | Rezervované | ON |
| 2 | MODE | ON: Prenosová rýchlosť 6,8Mbit/s |
| 3 | CHANNEL | OFF: kanál 2 |
| 4 | UNIT | ON: kotva |
| 5 | UNIT_ID[2] | A2 |
| 6 | UNIT_ID[1] | A1 |
| 7 | UNIT_ID[0] | A0 |
| 8 | Rezervované | OFF |

Tabuľka 3 Nastavenie DIP switchov pre tag.

| Pozícia | Funkcia | Popis |
|---------|-------------|----------------------------------|
| 1 | Rezervované | ON |
| 2 | MODE | ON: Prenosová rýchlosť 6,8Mbit/s |
| 3 | CHANNEL | OFF: kanál 2 |
| 4 | UNIT | OFF: tag |
| 5 | UNIT_ID[0] | T0 |
| 6 | Rezervované | OFF |

Na obrázku 15 je znázornený plán miestnosti a rozmiestnenie kotiev a jednotlivých tagov. TX popisuje polohu zmeranú pomocou laserového merača vzdialenosti a TsX strednú hodnotu polôh získaných programom DecaRangeRTLS.



Obrázok 15 Rozmiestnenie kotiev a jednotlivé polohy tagu

Po nastavení a rozmiestnení jednotiek je jedna z kotiev pripojená pomocou USB k počítaču.

Polohy všetkých kotiev boli pred samotným meraním zmerané laserovým meračom vzdialenosti a zaznamenané do prehľadnej tabuľky, vid' tabuľka 4.

Tabuľka 4 Pozície kotiev

| ID kotvy | X[m] | Y[m] | Z[m] |
|----------|-------|-------|------|
| A0 | 2,597 | 6,882 | 1,5 |
| A1 | 0,593 | 0,615 | 1,5 |
| A2 | 5,381 | 4,183 | 1,5 |

Samotné meranie je potom založené na premiestňovaní tagu po miestnosti. Meranie bolo uskutočnené aj mimo meraciu miestnosť, avšak v tomto prípade bolo meranie neúspešné, pretože program nedokázal tag lokalizovať. Každá poloha tagu je zmeraná najskôr pomocou laserového merača vzdialenosti a potom programom DecaRangeRTLS. Na obrázku 16 je vidieť záznam z programu.

Pre každý bod merania bolo zaznamenaných približne 300 meraní, čo odpovedá približne jednej minúte merania pri použitom nastavení.

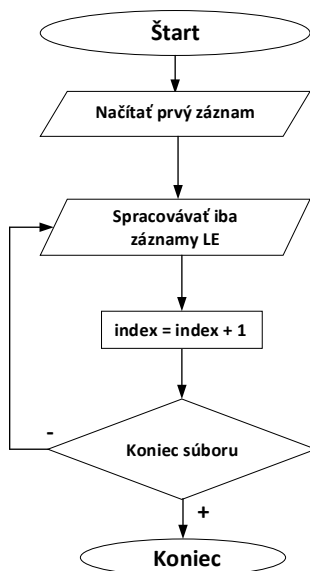
```
T:145940468:DecaRangeRTLS:LogFile:Ver. 2.10 TREK:Conf:Anchor0:1:Chan2
T:145940521:AP:0:2.6:6.882:1.5
T:145940521:AP:1:0.59:0.61:1.5
T:145940521:AP:2:5.381:4.183:1.5
T:145940521:AP:3:5:5:3
T:145940521:RR:0:0:5612:5612:47:15640
T:145940521:RR:0:1:5303:5303:47:15640
T:145940521:RR:0:2:1753:1753:47:15640
T:145940521:RM:0:7:47:15640
T:145940521:NL:0:11312:47:[nan,nan,nan]:5612:5303:1753:0
T:145940808:LE:0:11313:50:[6.47475,1.91552,1.18599]:5607:5336:1837:0
T:145940808:TS:0 avx:6.56328 avy:1.86747 avz:1.29168 r95:0.274961
```

Obrázok 16 Záznam z programu

Každý riadok obsahuje informáciu o čase, v ktorom bolo meranie uskutočnené. Napr. v zázname na obrázku 16 bol začiatok merania v 14:59:40,521. Za touto informáciou nasleduje vždy niektorý z druhov záznamu [10].

2.1.2 Spracovanie údajov

Spracovanie údajov sa robí pomocou programu MATLAB. V zložke Logs, ktorá sa nám vytvorila po nahraní prvého záznamu, musíme vyhľadať informácie o odhade vzdialenosti. Spôsob spracovania údajov je popísaný vývojovým diagramom.

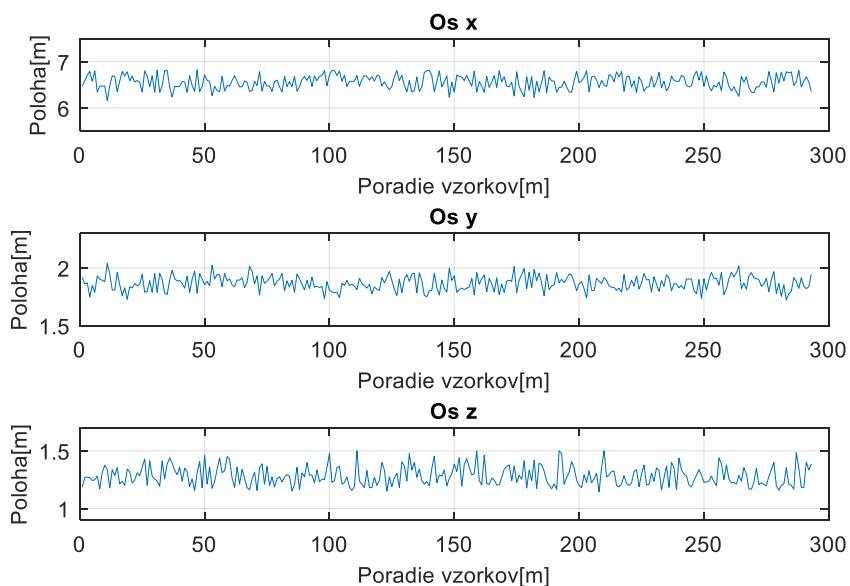


Obrázok 17 Vývojový diagram

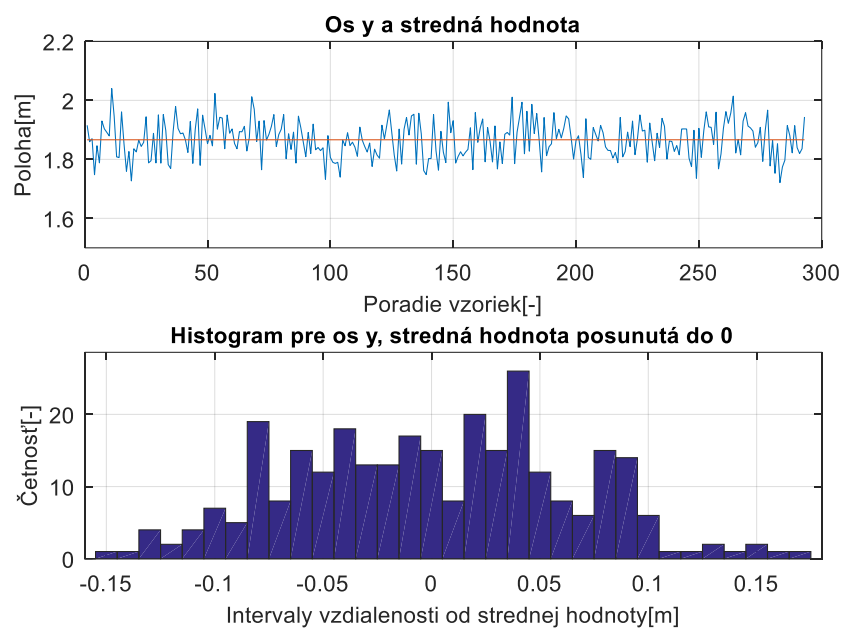
Takto vytvorené vektory sa následne vynesú do grafu. Pre tento vektor hodnôt sa vypočíta stredná hodnota, smerodajná odchýlka a vykreslí sa histogram.

Pre porovnanie boli vybraté tri polohy umiestnenia tagu, a to poloha s najhoršou, strednou a najlepšou presnosťou lokalizácie.

Ako prvá je vybratá poloha, ktorá bola lokalizovaná s najhoršou presnosťou, zobrazená na obrázku 18.

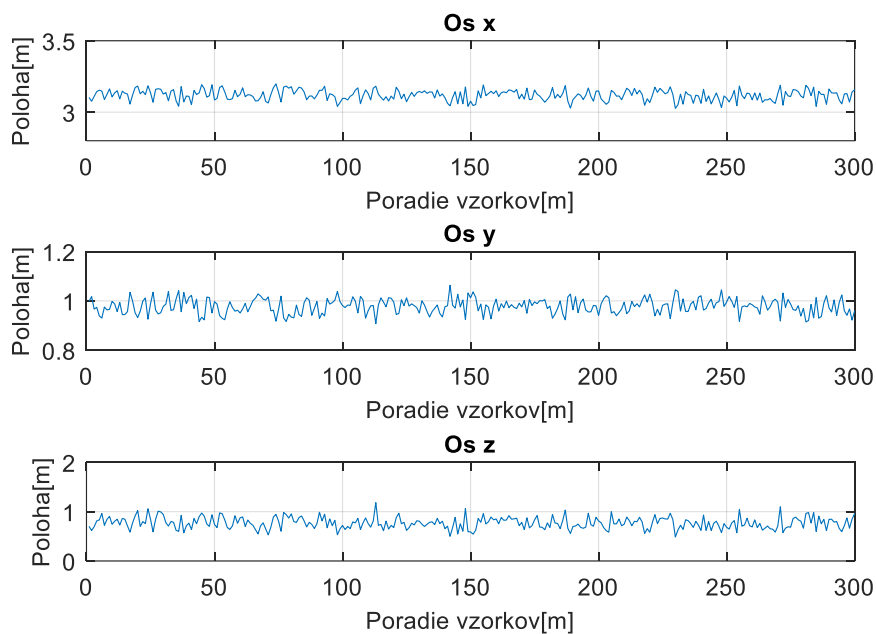


Obrázok 18 Poloha tagu s najhoršou presnosťou lokalizácie (index polohy 0)

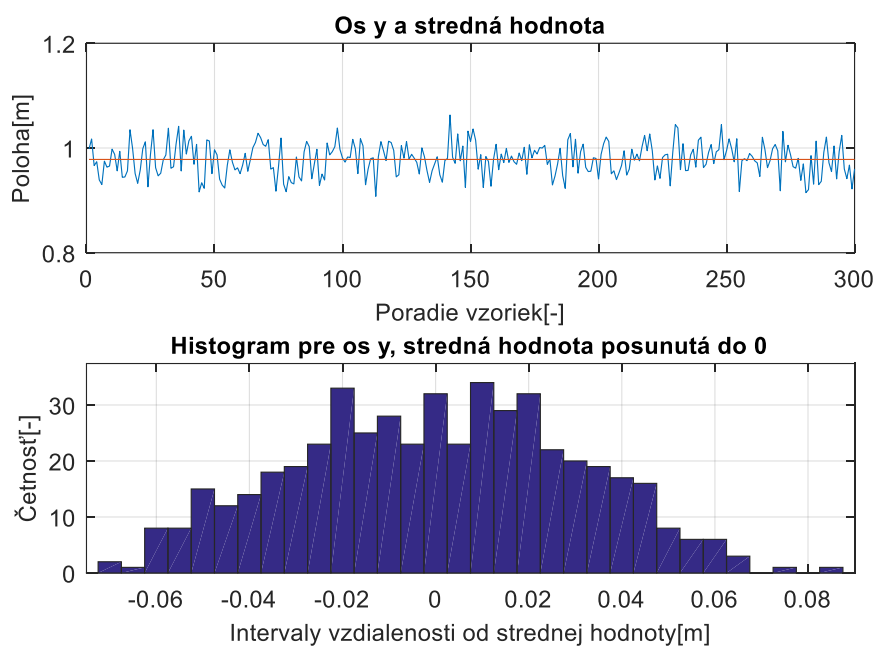


Obrázok 19 Os y (index polohy 0), stredná hodnota (červeným) a histogram pre najhoršiu presnosť určenia polohy

Ako druhá bola vybratá poloha so strednou presnosťou lokalizácie:

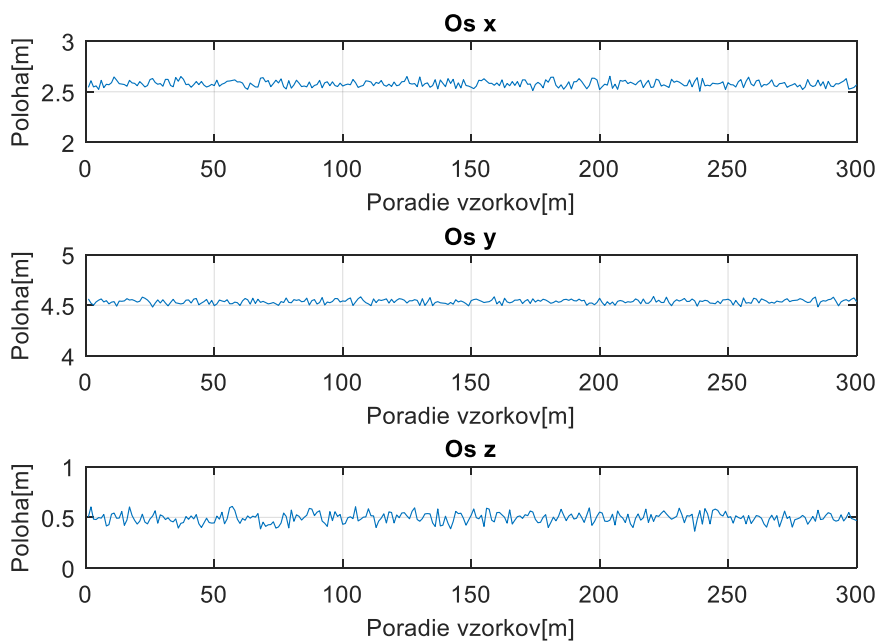


Obrázok 20 Poloha tagu so strednou presnosťou lokalizácie (index polohy 10)

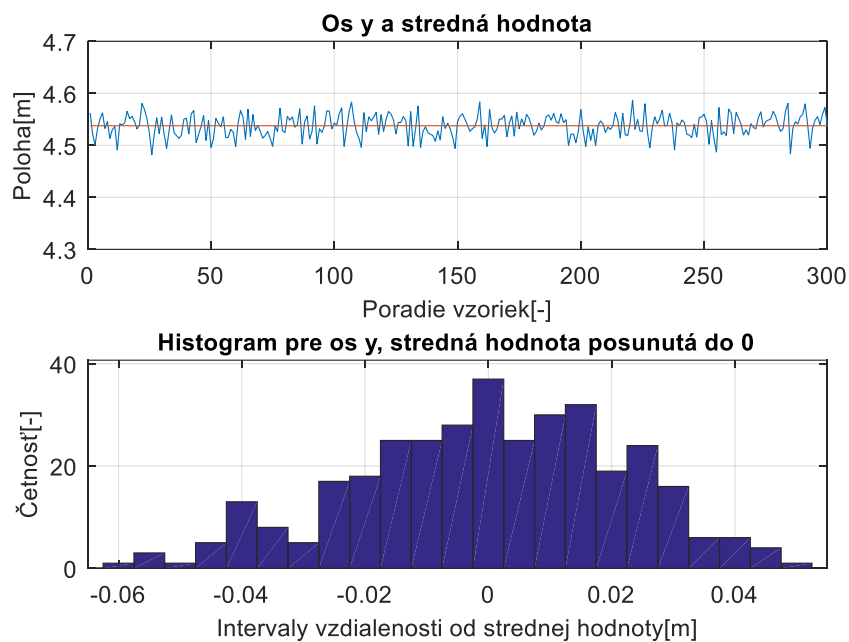


Obrázok 21 Os y (index polohy 10), stredná hodnota (červeným) a histogram pre strednú presnosť určenia polohy

Nakoniec bola vybratá poloha s najlepšou presnosťou lokalizácie:



Obrázok 22 Poloha tagu s najlepšou presnosťou lokalizácie (index polohy 8)



Obrázok 23 Os y (index polohy 8), stredná hodnota (červeným) a histogram pre polohu s najlepšou presnosťou určenia polohy

Keďže pred začiatkom každého merania boli súradnice tagu zmerané najskôr pomocou laserového merača vzdialenosti, dajú sa porovnať hodnoty namerané pomocou programu DecaRangeRTLS a hodnoty zistené laserovým meračom, pričom vieme, že laserový merač meral s chybou 2 mm. Tabuľka 5 obsahuje porovnanie nameraných hodnôt týmito dvomi spôsobmi merania vzdialenosti.

Tabuľka 5 Výsledky merania, u DecaRangeRTLS (x,y,z) ide o priemernú hodnotu

| index polohy | Laserový merač vzd. | | | DecaRangeRTLS | | | Smer. odchýl. x | Smer. odchýl. y | Smer. odchýl. z | Odchýlka x | Odchýlka y | Odchýlka z |
|--------------|---------------------|--------|-----|---------------|---------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------|
| | x | y | z | x | y | z | | | | | | |
| tag 0 | 5,248 | 2,785 | 1,5 | 6,5565 | 1,8665 | 1,2829 | 0,1506 | 0,0637 | 0,084 | 1,3085 | 0,9185 | 0,2171 |
| tag 1 | 5,161 | 1,45 | 1,5 | 6,3972 | 0,4727 | 1,212 | 0,0613 | 0,0472 | 0,1144 | 1,2362 | 0,9773 | 0,288 |
| tag 2 | 5,204 | 5,623 | 1,5 | 5,5937 | 5,3266 | 0,4 | 0,0199 | 0,022 | 0,0346 | 0,3897 | 0,2964 | 1,1 |
| tag 3 | 5,841 | 7,783 | 1,5 | 5,6296 | 7,4725 | -0,5821 | 0,0264 | 0,0259 | 0,0448 | 0,2114 | 0,3105 | 2,0821 |
| tag 4 | 5,179 | 9,108 | 1,5 | 4,9141 | 8,9449 | -0,3719 | 0,0279 | 0,0238 | 0,0596 | 0,2649 | 0,1631 | 1,8719 |
| tag 5 | 2,299 | 9,958 | 1,5 | 2,4658 | 10,2411 | 0,8639 | 0,0467 | 0,0319 | 0,2425 | 0,1668 | 0,2831 | 0,6361 |
| tag 6 | 0,478 | 9,708 | 1,5 | 0,5178 | 9,3613 | -1,4038 | 0,1186 | 0,1692 | 0,7147 | 0,0398 | 0,3467 | 2,9038 |
| tag 7 | 2,836 | 7,263 | 1,5 | 2,468 | 7,3928 | 0,7996 | 0,0186 | 0,0122 | 0,0227 | 0,368 | 0,1298 | 0,7004 |
| tag 8 | 2,559 | 4,534 | 1,5 | 2,5791 | 4,5377 | 0,4971 | 0,0306 | 0,0216 | 0,0504 | 0,0201 | 0,0037 | 1,0029 |
| tag 9 | 2,94 | 3,032 | 1,5 | 3,1567 | 2,8824 | 0,441 | 0,0447 | 0,03 | 0,0447 | 0,2167 | 0,1496 | 1,059 |
| tag 10 | 2,924 | 1,224 | 1,5 | 3,1188 | 0,9782 | 0,7681 | 0,0374 | 0,0301 | 0,1223 | 0,1948 | 0,2458 | 0,7319 |
| tag 11 | 0,788 | 4,93 | 1,5 | 0,5047 | 5,1055 | 0,9008 | 0,0865 | 0,1003 | 0,2907 | 0,2833 | 0,1755 | 0,5992 |
| tag 12 | 0,52 | 2,651 | 1,5 | 0,1072 | 2,8985 | 1,0071 | 0,0293 | 0,0195 | 0,149 | 0,4128 | 0,2475 | 0,4929 |
| tag 13 | 1,789 | 0,373 | 1,5 | 1,596 | 0,3502 | 1,0071 | 0,0459 | 0,0261 | 0,0649 | 0,193 | 0,0228 | 0,4929 |
| tag 14 | 1,756 | 2,983 | 1,5 | 1,7068 | 3,0038 | 0,7372 | 0,0304 | 0,0305 | 0,0753 | 0,0492 | 0,0208 | 0,7628 |
| tag 15 | -1,632 | 10,364 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 16 | -2,4 | 11,412 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 17 | -1,029 | 10,672 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 18 | -2,258 | 12,35 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 19 | -2,29 | 14,394 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 20 | -1,171 | 16,312 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 21 | -2,213 | 15,447 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 22 | -1,13 | 16,784 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| tag 23 | -1,107 | 17,856 | 1,5 | 0,0112 | 17,4451 | -2,1631 | 1,0116 | 0,6388 | 1,7778 | 1,1182 | 0,411 | 3,6631 |
| tag 24 | -1,063 | 21,271 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Zo známej polohy zmeranej laserovým meračom (skutočnej) a polohy zistenej pomocou softwaru (zmeranej) sa dá vypočítať vzdialenosť medzi týmito dvomi polohami pomocou rovnice (6):

$$Vzd. skut. \rightarrow zmer. = \sqrt{(xz - xs^2) + (yz - ys^2) + (zz - zs^2)}, \quad (6)$$

kde [xz, yz, zz] je zmeraná poloha a [xs, ys, zs] je skutočná poloha.

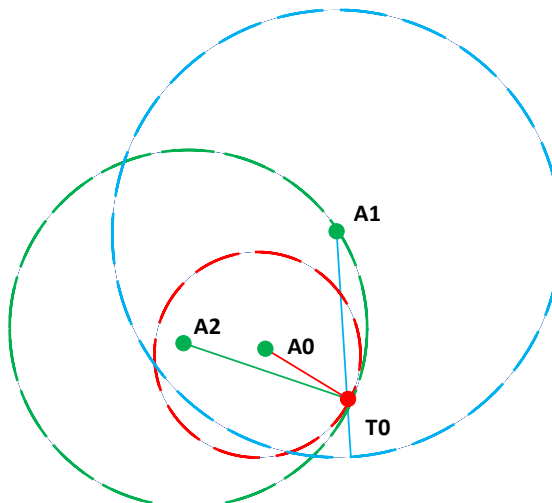
Tabuľka 6 Vzdialenosť medzi skutočnou a zmeranou polohou (x,y,z - stredné hodnoty)

| index polohy | Skutočná poloha | | | Zmeraná poloha | | | Vzdialenosť skutočná -> zmeraná |
|--------------|-----------------|--------|-----|----------------|---------|---------|---------------------------------|
| | x | y | z | x | y | z | |
| tag 0 | 5,248 | 2,785 | 1,5 | 6,5565 | 1,8665 | 1,2829 | 1,6132 |
| tag 1 | 5,161 | 1,45 | 1,5 | 6,3972 | 0,4727 | 1,212 | 1,602 |
| tag 2 | 5,204 | 5,623 | 1,5 | 5,5937 | 5,3266 | 0,4 | 1,204 |
| tag 3 | 5,841 | 7,783 | 1,5 | 5,6296 | 7,4725 | -0,5821 | 2,1157 |
| tag 4 | 5,179 | 9,108 | 1,5 | 4,9141 | 8,9449 | -0,3719 | 1,8976 |
| tag 5 | 2,299 | 9,958 | 1,5 | 2,4658 | 10,2411 | 0,8639 | 0,716 |
| tag 6 | 0,478 | 9,708 | 1,5 | 0,5178 | 9,3613 | -1,4038 | 2,9247 |
| tag 7 | 2,836 | 7,263 | 1,5 | 2,468 | 7,3928 | 0,7996 | 0,8018 |
| tag 8 | 2,559 | 4,534 | 1,5 | 2,5791 | 4,5377 | 0,4971 | 1,0031 |
| tag 9 | 2,94 | 3,032 | 1,5 | 3,1567 | 2,8824 | 0,441 | 1,0912 |
| tag 10 | 2,924 | 1,224 | 1,5 | 3,1188 | 0,9782 | 0,7681 | 0,7963 |
| tag 11 | 0,788 | 4,93 | 1,5 | 0,5047 | 5,1055 | 0,9008 | 0,6856 |
| tag 12 | 0,52 | 2,651 | 1,5 | 0,1072 | 2,8985 | 1,0071 | 0,6889 |
| tag 13 | 1,789 | 0,373 | 1,5 | 1,596 | 0,3502 | 1,0071 | 0,5298 |
| tag 14 | 1,756 | 2,983 | 1,5 | 1,7068 | 3,0038 | 0,7372 | 0,7647 |
| tag 15 | -1,632 | 10,364 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 16 | -2,4 | 11,412 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 17 | -1,029 | 10,672 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 18 | -2,258 | 12,35 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 19 | -2,29 | 14,394 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 20 | -1,171 | 16,312 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 21 | -2,213 | 15,447 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 22 | -1,13 | 16,784 | 1,5 | - | - | - | - |
| tag 23 | -1,107 | 17,856 | 1,5 | 0,0112 | 17,4451 | -2,1631 | 3,8619 |
| tag 24 | -1,063 | 21,271 | 1,5 | - | - | - | - |

Z jednotlivých takto získaných vzdialeností bola vypočítaná stredná hodnota a smerodajná odchýlka:

Stredná hodnota = 1,3935 m
Smerodajná odchýlka = 0,9270 m

V prípade, že bolo meranie uskutočnené mimo meraciu miestnosť, kde bol tag umiestnený za stenou, algoritmus demonštračného programu nedokázal vypočítať polohu tagu. V zázname z týchto meraní sú ale zaznamenané informácie o vzdialenosti tagu k jednotlivým kotvám. Z toho by sa dalo usúdiť, že program nedokázal vypočítať polohu v prípade, keď sa kružnice nepretli v jednom bode. Na nasledujúcom obrázku je príklad určovania jednej polohy tagu v prípade, že sa tag nachádzal mimo meraciu miestnosť.



Obrázok 24 Určovanie polohy mimo meraciu miestnosť

Keďže kotva A1 bola už vo vzdialenosti skoro 10,5 m od tagu, chyba určenia presnej polohy v takom prípade bola už príliš veľká a tag nedokázal byť presne lokalizovaný.

3. KNIŽNICA PRE KOMUNIKÁCIU S TREK1000 v C#

V tejto kapitole je popísaná funkcia a štruktúra vlastnej objektovej knižnice vytvorenej v jazyku C#.

3.1 Visual Studio

Knižnica bola vytvorená prostredníctvom programu Visual Studio. Visual Studio je integrované vývojové prostredie (IDE) vyvinuté spoločnosťou Microsoft na vývoj GUI (Graphical User Interface), konzoly, vývojových, mobilných a webových aplikácií, cloudu, webových služieb a ďalších [16].

3.2 Funkcia knižnice

Táto knižnica umožňuje komunikáciu s vyhodnocovacou súpravou TREK1000. Táto komunikácia prebieha cez virtuálny COM port. Prostredníctvom takéhoto sériového portu môžu jednotky systému TREK1000 komunikovať s počítačom a prenášať dáta pomocou virtuálneho nulového modemu.

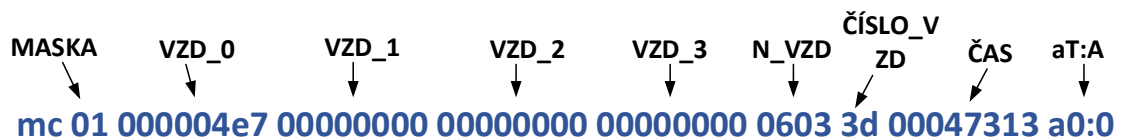
Funkcia vyplýva z komunikačného protokolu, popísaného v kapitole 1.6. Po spustení sa zvolí COM port a po otvorení COM portu jednotka začne posilať dáta. Pre otestovanie funkčnosti boli zaznamenané údaje pre jeden tag T0 a jednu kotvu A0 vo vzdialenosti približne 0,8 m, viď príloha 2.

Zaznamenané dáta sú následne dekódované príslušným algoritmom a z takto dekódovanej správy sú vybraté informácie o vzdialenosti medzi tagom a kotvou. Tieto vzdialenosti sú následne využívané ako vstupný parameter pre výpočet polohy tagu.

3.3 Štruktúra knižnice

Knižnica bola vytvorená z pôvodnej WPF aplikácie pre sériovú komunikáciu a pomocou nej bola testovaná aj funkcia knižnice. Na tvorbu bolo použité objektovo orientované programovanie. Jednotlivé triedy v sebe zahŕňajú metódy pre výber COM portu (class AvailableCOMPort), komunikáciu s COM portom - otvorenie COM portu, prijímanie a odosielanie sériových dát (class CommTREK1000) a dekódovanie prijatých dát (class AnchorsDistances), ktoré sú pomocou metódy Trek1000_DataReceived zobrazované v objekte TextBoxOutput triedy TextBox.

Správa je prijatá v hexadecimálnom tvare, ktorý je potrebné dekódovať podľa ASCII tabuľky na formát s obsahom v desiatkovej sústave. Pre zistenie informácie o vzdialenosti je potrebné vybrať správne údaje z každej správy a preto je nutné poznať, na ktorej pozícii sa nachádza aká informácia. Na obrázku 25 sú vysvetlené jednotlivé časti správy, ktorú poslal tag [15].



Obrázok 25 Význam častí správy

| | |
|-----------|--|
| MASKA | Udáva, ktoré informácie o vzdialenosti sú platné. Ak MASKA=1, znamená to, že je platná informácia len o VZD_0. |
| VZD_0 | Vzdialenosť medzi tagom a kotvou s ID 0. |
| VZD_1 | Vzdialenosť medzi tagom a kotvou s ID 1. |
| VZD_2 | Vzdialenosť medzi tagom a kotvou s ID 2. |
| VZD_3 | Vzdialenosť medzi tagom a kotvou s ID 3. |
| N_VZD | Celkový počet zistených vzdialeností, ktoré prijal tag. |
| ČÍSLO_VZD | Poradové číslo poslednej prijatej informácie o vzdialenosti. |
| ČAS | Čas poslednej prijatej správy o vzdialenosti. |
| aT:A | T značí ID tagu a A značí ID kotvy [15]. |

Na obrázku 26 je príklad dekódovania takejto správy prijatej od tagu.

```
This measurement contains 1 valid distances between the anchors and the tag
Distance between Anchor0 and Tag is 215 mm
Distance between Anchor1 and Tag is 0 mm
Distance between Anchor2 and Tag is 0 mm
Distance between Anchor3 and Tag is 0 mm
The number of all distances the tag has received: 964
The serial number of the last received distance information is 208
Time of the last received distance is 111404
```

Obrázok 26 Príklad dekódovanej správy

4. PREDPRIPRAVENÁ APLIKÁCIA

V tejto kapitole je popísaný algoritmus výpočtu súradníc tagu pomocou predpripravenej aplikácie DecaRangeRTLS od firmy Decawave.

4.1 DecaRangeRTLS

Lokalizačné systémy v reálnom čase (RTLS – Real-time locating systems) sa používajú na automatickú identifikáciu a sledovanie polohy objektov alebo osôb v reálnom čase, zvyčajne v budove alebo v inej uzavretej miestnosti [17]. Väčšina týchto systémov funguje tým spôsobom, že sú dané pevné referenčné body, ktoré prijímajú bezdrôtový signál. Signál, ktorý vysielajú tagy (sledovaní ľudia, objekty) a tým je určovaná ich poloha [17].

Fyzickou vrstvou technológie RTLS je zvyčajne nejaká forma vysokofrekvenčnej komunikácie [17]. Aplikácia DecaRangeRTLS používa technológiu UWB, existuje však široká škála koncepcií a návrhov systémov, ktoré umožňujú lokalizáciu v reálnom čase.

4.2 Algoritmus pre výpočet polohy tagu

Algoritmus, podľa ktorého sú počítané súradnice tagu je obsiahnutý v zdrojovom kóde súboru „trilateration.cpp“ aplikácie DecaRangeRTLS.

V kóde je použitá knižnica „trilateration.h“, v ktorej sú definované jednotlivé operácie s vektormi, ako je sčítanie, odčítanie, násobenie, delenie, skalárny a vektorový súčin.

Celý kód súboru „trilateration.cpp“ je rozdelený na 5 základných častí:

1. Funkcia `gdoprate()`, ktorá vypočíta geometrické zoslabenie presnosti (výsledok v rozmedzí 0-1). Čím menšie číslo, tým lepšia presnosť priesečníka.
2. Funkcia `sphereline()`, ktorá nájde priesečník gule s priamkou. Výsledkom sú dva priesečníky `mu1` a `mu2`, ako riešenia kvadratickej rovnice.
3. Funkcia `trilateration()` pre samotnú trilateráciu, ktorá môže mať buď dve riešenia (pokiaľ sa vykonáva pomocou 3 sfér) alebo jedno riešenie (pokiaľ sa vykonáva pomocou 4 sfér).
4. Funkcia `deca_3dlocate()`, ktorá volá funkciu `trilateration()`. V prípade, že niektorá zo sfér spôsobila, že bolo riešenie neplatné, zvýši sa polomer každej z nich, aby sa zabezpečilo, že sa priesečník nájde. Následne prevádza trilateráciu znova vo vybranom režime (s 3 alebo 4 guľami) a výsledkom sú zase buď dve alebo jedno riešenie a parameter `nosolution_count`, ktorý vráti počet neúspešných pokusov zväčšením polomeru gúl pred nájdením priesečníka.

5. Funkcia `GetLocation()`, ktorá volá funkciu `deca_3dlocate()` pre získanie najpresnejšej polohy. Potom, ak boli použité štyri kotvy, tak pomocou 4. kotvy nájde najlepší výsledok a to tak, že nájde najbližšiu vzdialenosť k zmeranej vzdialenosti prijatej od 4. kotvy. Pokiaľ nebola poskytnutá 4. vzdialenosť (trilaterácia bola prevádzaná len s tromi kotvami), porovná sa tretia súradnica vypočítaných riešení a vyberie sa výsledok s menšou.

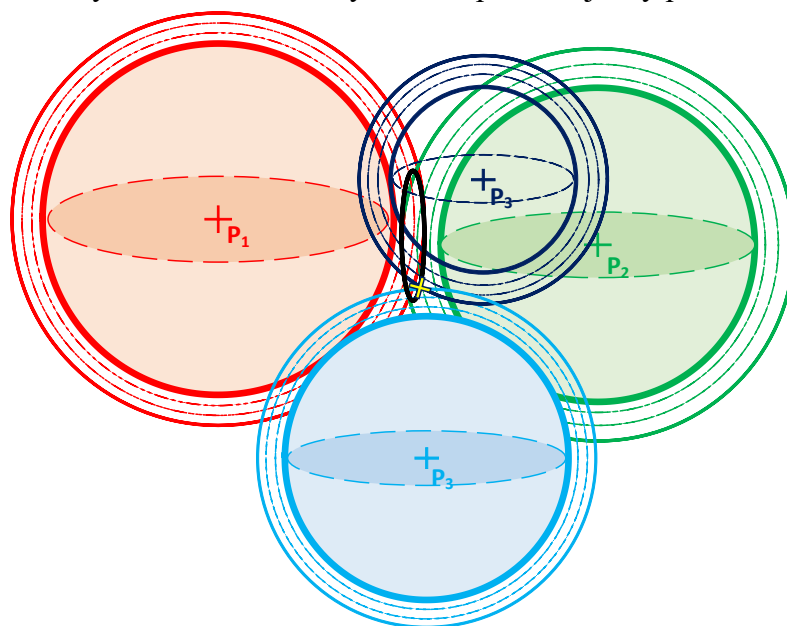
Kód je tiež opatrený kontrolou sústrednosti sfér. Pokiaľ sú ktorékoľvek dve sféry sústredné (gule so spoločným stredom), potom výpočet nepokračuje a automaticky vráti chybu.

Odhad polohy tagu (trilaterácia) sa prevádza postupným vytváraním vektorov pomocou rôznych vektorových operácií, výpočtom veľkostí týchto vektorov a kombináciou podmienok vzhľadom k premennej, označovanej ako „maxzero“. V tejto premennej je uložené najväčšie nezáporné číslo považované za nulu a na začiatku zdrojového kódu je doňho uložená hodnota 0,001.

Určenie polohy týmto algoritmom je teda založené na zväčšovaní polomeru gúľ, až pokým nebude nájdený priesečník.

Celý postup je vysvetlený na nasledujúcom príklade so 4 sférami:

Na začiatku je prevedený odhad polohy pomocou trilaterácie. Trilaterácia bola neúspešná, pretože sa sféry nepretli v jednom bode. V tom prípade sa defaultne zväčší polomer každej z nich o 0,1 a pričíta sa pokus o nájdenie priesečníka. Tento postup sa opakuje až pokým nie je trilaterácia úspešná alebo do jedenásteho pokusu. Ak bola trilaterácia úspešná, výsledok sa uloží do príslušnej premennej metóda vráti vypočítanú polohu a trilateračný režim. Ak nebol úspešne nájdený priesečník ani po jedenástom pokuse, program vypíše hlášku „No Location“ a počet neúspešných pokusov. Napr. na obrázku 27 boli sféry zväčšené trikrát, kým bol úspešne nájdený priesečník.



Obrázok 27 Príklad odhadu polohy priesečníka vo funkcii `deca_3dlocate`

Táto metóda môže spôsobovať nepresnosť určenia polohy a navyše, nedokáže určiť polohu v prípade, kedy sa sféry prekrývajú v oblasti možných polôh tagu (ako bolo ukázané v kapitole 1.4 na obrázku 11).

5. NOVÁ METÓDA LOKALIZÁCIE

Táto časť práce je zameraná na popis novej metódy lokalizácie, ktorá má za úlohu lokalizovať tag v prípade, kedy sa sféry nepretínajú v jednom bode.

5.1 Váhová trilaterácia

V priebehu výpočtu polohy metódou trilaterácie môže nastať viacero možností, kedy neexistuje iba jeden priesečník. Kružnice sa nepretnú v jednom bode, ale vytvoria skôr oblasť možných polôh.

Na obrázku 28 sú naznačené najpravdepodobnejšie prípady, pri ktorých môže dochádzať k nepresnému určeniu polohy tagu. Existuje viac možných prípadov (menej pravdepodobných), ako sú rôzne možnosti koncentricity kružníc (napr. dva kruhy sa pretínajú a tretí je obsiahnutý v jednom z nich, jeden kruh je izolovaný a jeden z ďalších je obsiahnutý v druhom apod.). Keďže algoritmus predpripravenej aplikácie je opatrený kontrolou sústrednosti sfér, tieto možnosti neuvažujeme.



Obrázok 28 Možnosti, ktoré môžu nastať pri výpočte polohy tagu

Pre tieto prípady sa používa tzv. metóda váhovej trilaterácie, ktorá je založená na predpoklade, že odhad vzdialeností od zariadení, ktoré sú bližšie k odosielateľovi je presnejší. Táto metóda počíta s párovými váhami medzi jednotlivými zariadeniami. Pokiaľ sú tri zariadenia C1, C2 a C3 vo vzdialenosti r_1 , r_2 , r_3 od odosielateľa, potom príslušné párové váhy medzi zariadeniami sa vypočítajú pomocou (7)[18]:

$$\begin{cases} \omega_{ab} = \frac{r_a}{r_b} & \text{pokiaľ } r_a < r_b \\ \omega_{ba} = \frac{r_b}{r_a} & \text{pokiaľ } r_b < r_a \end{cases} \quad \text{kde } a = 1,2,3; b = 1,2,3 \quad (7)$$

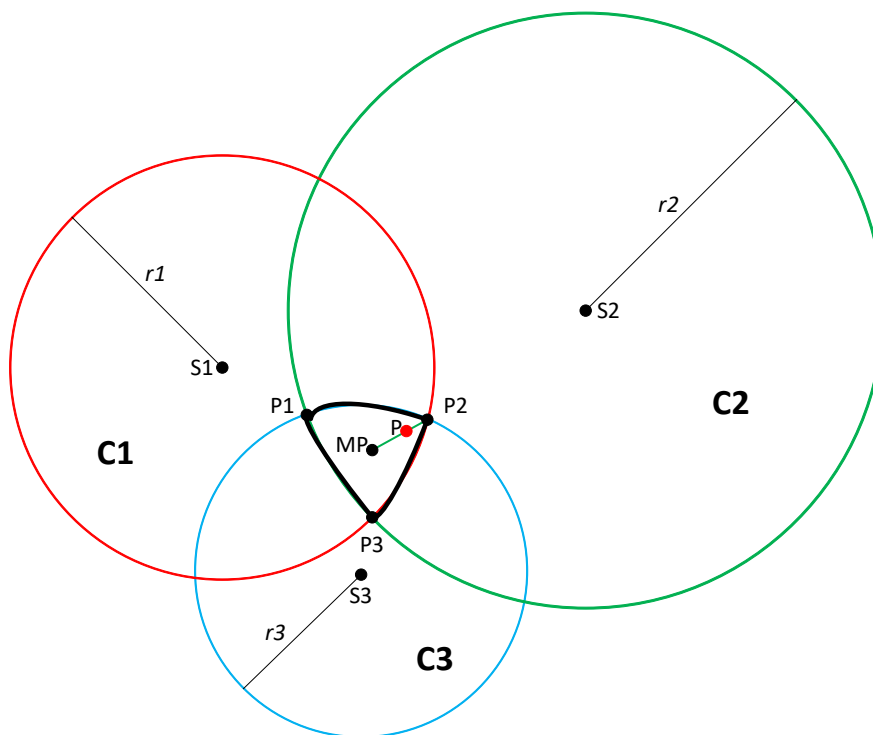
Prvým krokom je zvolenie počiatočného odhadu (bodu), ktorým je vo väčšine prípadov stredný bod oblasti novej polohy. Tento bod je následne posunutý

k zariadeniu, ktoré je najbližšie k odosielateľovi, teda k bodu, ktorý poskytuje menšiu vzdialenosť d od odosielateľa, vzdialenosť úmernú váham vypočítaným v rovnici (7) [18].

Metóda je aplikovateľná pre všetky vyššie zmienené prípady, v tejto práci je však popísaná iba implementácia metódy na prípad, kedy kružnice majú ako priesečník oblasť možných polôh tagu a ktorá tiež bola použitá pre vylepšenie lokalizačného algoritmu v jazyku C#.

5.1.1 Implementácia metódy v 2D

V prípade znázornenom na obrázku 29 nie je priesečníkom kruhov jeden bod, ale plocha trojuholníka, tvorená tromi bodmi P1, P2 a P3, v ktorej sa môže daný bod vyskytovať.



Obrázok 29 Kruhy sa pretínajú v oblasti [18]

Body P1, P2 a P3 môžu byť nájdené napr. ako priesečníky ležiace vo vnútri tretieho kruhu. Zistia sa súradnice priesečníkov dvoch kruhov a ak aspoň jeden z nich leží vnútri tretieho kruhu (vzdialenosť priesečníka od stredu kruhu je menšia ako polomer kruhu), jedná sa o prípad, kedy sa kruhy pretli v oblasti a daný bod je jeden z hľadaných bodov. Následne sú vypočítané priesečníky ďalších kruhov a z nich sa vyberú tie, ktoré ležia bližšie k prvému bodu.

Ako počiatočný bod MP je zvolené ťažisko tohto trojuholníka [18]:

$$P_x = \frac{P_{1x} + P_{2x} + P_{3x}}{3} \quad (8)$$

$$P_y = \frac{P_{1y} + P_{2y} + P_{3y}}{3} \quad (9)$$

$$MP = [P_x, P_y] \quad (10)$$

Následne sú vypočítané váhy pomocou vzdialeností dvoch najbližších prijímačov. V tomto prípade sú to prijímače S3 a S1. Z nich vyberieme ten s menším polomerom, pretože je pre výpočet viac dôveryhodný a vydělíme ho polomerom kruhu, v ktorom sa tieto dva kruhy pretínajú [18]:

$$\omega_{32} = \frac{r_3}{r_2} \quad (11)$$

Bod MP sa posunie do bodu, v ktorom sa kruhy C3 a C1 pretínajú. Na obrázku 29 je to bod P2. Súradnice hľadaného bodu P (poloha odosielača) sú potom dané vzťahmi (13)(14)[18]:

$$P_x = P_x + (1 - \omega_{32}) \cdot d \cdot \cos \theta \quad (12)$$

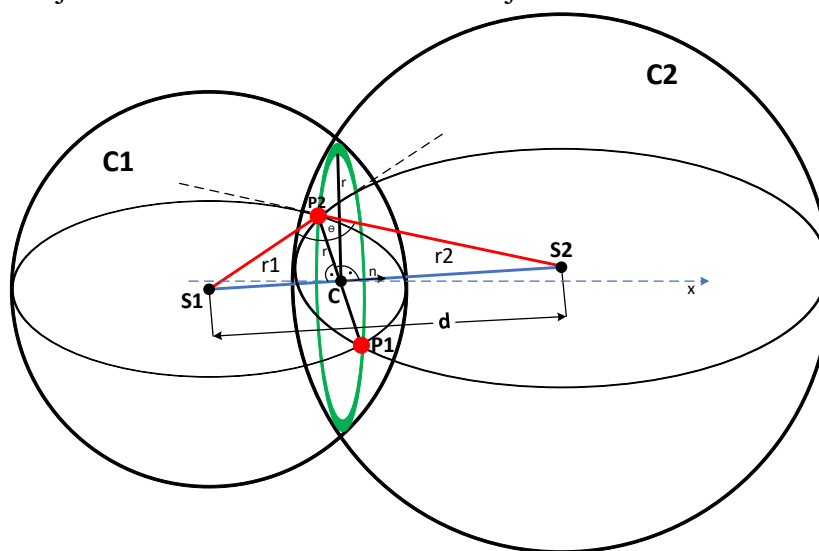
$$P_y = P_y + (1 - \omega_{32}) \cdot d \cdot \sin \theta \quad (13)$$

$$P = [P_x, P_y] \quad (14)$$

Kde θ je uhol, ktorý zvierá úsečka MP-P2 s osou x a d je vzdialenosť medzi MP a P2 [18].

5.1.2 Implementácia metódy v 3D

V trojrozmernom priestore je situácia zložitejšia, ale princíp metódy ostáva. Rozdielom je, že prienikom 2 guľí nie sú dva body, ale kruh a tieto dva body (body P1 a P2 na obr. 30) sa nachádzajú na obvode tohto kruhu. Situácia je zobrazená na obrázku 30.



Obrázok 30 Prienik 2 sfér[19]

Najskôr je vypočítaná vzdialenosť stredov sfér C_1 a C_2 . Potom si definujeme stred kruhu, ktorý je prienikom týchto dvoch sfér ako (15) [19]:

$$C = C_1 + h \cdot (C_2 - C_1) \quad (15)$$

Kde h vypočítame ako (16) [19]:

$$h = \frac{1}{2} + \frac{r_1^2 - r_2^2}{2d^2} \quad (16)$$

Priesečníky sa nachádzajú na kružnici so stredom C a polomerom (17) [20]:

$$r = \frac{\sqrt{4r_1^2 d^2 - (r_1^2 + d^2 - r_2^2)^2}}{2d} \quad (17)$$

Tento polomer sa dá považovať za vektor, ktorý opíše jeden celý kruh a teda vznikne celý kruh riešení. Tento kruh leží v rovine kolmej na deliacu os a normála tejto roviny je (18) [19]:

$$n = \frac{C_2 - C_1}{d} \quad (18)$$

Vypočítame uhol priesečníka (19):

$$\theta = \cos^{-1} \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2} \quad (19)$$

Následne vypočítame dotyčnicu t ako vektorový súčin osi x a normálového vektoru n a dotyčnicu b ako vektorový súčin t a normálového vektoru n .

Ľubovoľný bod na kružnici sa potom dá nájsť pomocou vzťahu (20) [19]:

$$P_i(\theta) = C + r(t \cdot \cos \theta + b \cdot \sin \theta) \quad (20)$$

Takýmto spôsobom je určená poloha všetkých priesečníkov. Následne sa zisťuje, či sa priesečník nachádza vo vnútri tretej sféry a ak áno, je to jeden z 3 priesečníkov, ktoré hľadáme. Ďalší postup je potom rovnaký ako v 2D priestore s tým rozdielom, že je počítané s tromi súradnicami.

6. KNIŽNICA PRE TRILATERÁCIU V C#

V tejto kapitole je popísaná funkcia vlastnej objektovej knižnice pre výpočet polohy tagu metódou trilaterácie.

6.1 Funkcia a štruktúra knižnice

Pre účely výpočtu polohy tagu bola vytvorená knižnica v jazyku C#, v ktorej bol použitý a upravený algoritmus zo súboru „trilateration.cpp“ aplikácie DecaRangeRTLS. Knižnica využíva dekodované dáta zo skorej vytvorenej knižnice pre komunikáciu s TREK1000.

Na vytvorenie knižnice bolo použité objektovo orientované programovanie. Bolo vytvorených desať tried, ktoré obsahujú jednotlivé metódy pre trilateráciu vo vybranom režime (s tromi alebo štyrmi kotvami), pre získanie pozície v prípade, kedy sa sféry nepretli v jednom bode a pre nájdenie najlepšieho riešenia, ktoré je následne považované za výslednú polohu tagu.

Pre spustenie výpočtu polohy tagu je potrebné zavolať metódu getLocation z triedy GetLocation, ktorej vstupnými parametrami sú pozície kotiev, vzdialenosti jednotlivých kotiev od tagu a parametre maxzero a CmErrorAdded. Parameter maxzero tu zastáva rovnakú úlohu ako v pôvodnej aplikácii (najväčšie nezáporné číslo považované za nulu) a je doňho uložená hodnota 0,001 a premenná CmErrorAdded udáva počet opakovaní cyklu do – while, v ktorom sa každým opakovaním zväčší polomer sfér o hodnotu 0,1. V tejto premennej je uložená hodnota 10, takže sféry sa zväčšia maximálne o hodnotu 1 a ak ani potom nie je lokalizovaný priesečník, program vypíše hlášku „No Location“ a počet neúspešných pokusov, ktorý bude v tomto prípade 11. Metóda getLocation potom zavolá metódu Solution z triedy deca3DLocate a tá zavolá metódu FindLocation z triedy trilateration.

Knižnica zahŕňa aj triedy, ktoré neobsahujú žiadnu metódu (AnchorPositions a FindLocationResult), ale boli vytvorené iba za účelom definovania objektov a ich vlastností, do ktorých sú ukladané hodnoty vypočítané jednotlivými metódami, prípadne ako vstupy pre metódy.

Dôležitá je trieda WeightedTrilateration, ktorá obsahuje metódu weightedTrilateration pre výpočet polohy v prípade, že sféry sa pretínajú v oblasti a neexistuje teda jediný priesečník. Pre tento prípad bola použitá metóda váhovej trilaterácie, ktorá bola popísaná v kapitole 5. Táto metóda volá metódu FindPoints, ktorá vypočíta súradnice priesečníkov, ktoré túto oblasť vytvárajú pomocou algoritmu popísaného v kapitole 5.1.2. Metóda sa zavolá aj v prípade, kedy nejde presne o daný prípad. Pre tieto situácie vráti metóda error a je použitá pôvodná metóda.

6.2 Test knižnice

Funkčnosť knižnice bola otestovaná pomocou testovacieho súboru, ktorý obsahuje triedu s dvomi testovacími metódami.

Prvá metóda, `GetLocation`, testuje knižnicu pre prípad, kedy sa sféry pretínajú v jednom bode. Test volá metódu pre získanie pozície, ktorej vstupnými parametrami sú pozície kotiev a vzdialenosti kotiev od tagu. Následne je výsledok porovnávaný s pozíciou tagu, ktorá bola zaznamenaná pomocou programu `DecaRangeRTLS`. Výsledná pozícia vypočítaná pomocou algoritmu v novo vytvorenej knižnici bola zhodná s výstupnou pozíciou z programu `DecaRangeRTLS`, čo znamená, že test bol úspešný.

Druhá metóda, `weightedTrilaterationTest`, testuje správnosť algoritmu pre lokalizáciu tagu v prípade, že sa sféry pretínajú v oblasti. Pri tejto testovacej metóde bola využitá možnosť zvoliť povolenú odchýlku novo vypočítanej hodnoty od predpokladanej, keďže sa predpokladala istá nepresnosť určenia polohy. Účelom testu tejto novej metódy bolo zistiť, či nová metóda dokáže presnejšie vypočítať pozíciu tagu ako metóda používaná v predpripravenej aplikácii v prípade, kedy sa sféry pretínajú v oblasti. Výsledky jednotlivých testov sú zhrnuté v tabuľke 7. Nová metóda vypočítala polohu tagu v teste 1 s odchýlkou (7):

$$errA = \sqrt{(A_x - H_x)^2 + (A_y - H_y)^2 + (A_z - H_z)^2} \quad (7)$$

$$errA = \sqrt{(2 - 2)^2 + (0,3 - 1)^2 + (3 - 1,5)^2}$$

$$errA = 1,65$$

Kde A označuje pozíciu tagu vypočítanú pomocou novej metódy a H skutočnú pozíciu tagu.

| Pozície kotiev | | | |
|----------------|---|---|-----|
| | x | y | z |
| A0 | 0 | 0 | 1,5 |
| A1 | 2 | 0 | 1,5 |
| A2 | 0 | 1 | 1,5 |

Tabuľka 7 Porovnanie výsledkov výpočtu pomocou nového a pôvodného algoritmu

| Číslo testu | Vzdialenosti od kotiev [m] | | | Skutočná pozícia | | | Pozícia určená pomocou novej metódy | | | Pozícia určená pomocou pôvodnej metódy | | |
|-------------|----------------------------|------|------|------------------|---|-----|-------------------------------------|---------|--------|--|--------|--------|
| | A0:T | A1:T | A2:T | x | y | z | x | y | z | x | y | z |
| test 1 | 2,736 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1,5 | 1,9994 | 0,3222 | 2,9918 | 0 | 0 | 0 |
| test 2 | 3,326 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1,5 | 1,8305 | 0,4167 | 2,9915 | 0 | 0 | 0 |
| test 3 | 2,336 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1,5 | 2,2628 | -0,1859 | 2,635 | 2,4482 | 1,3964 | 1,1853 |
| test 4 | 2,536 | 1.1 | 2 | 2 | 1 | 1,5 | 2,4076 | 0,2667 | 3,1386 | 0 | 0 | 0 |
| test 5 | 2,236 | 1.1 | 3 | 2 | 1 | 1,5 | 1,8769 | -1,7801 | 1,8967 | 0 | 0 | 0 |

Z tabuľky 7 je vidieť, že pozícia bola zisťovaná aj pomocou algoritmu z predpripravenej aplikácie, ale v tomto prípade nedokázal vo väčšine prípadov algoritmus polohu vypočítať.

Z uvedeného sa dá usúdiť, že test novej metódy bol úspešný, pretože dokázala v danej situácii lepšie určiť polohu tagu ako metóda predpripravenej aplikácie.

ZÁVER

Náplňou tejto práce bolo preskúmanie vlastností UWB signálov a oblastí aplikácie ich využitia, a to najmä pre lokalizáciu vnútri budov. Po dôkladnom preštudovaní chovania týchto signálov bol popísaný princíp lokalizácie, tzv. trilaterácia, ktorý používa aj vyhodnocovací systém TREK1000 od spoločnosti Decawave. S týmto systémom bolo prevedené meranie, a to pomocou softwaru DecaRangeRTLS. Po vyhodnotení výsledkov tohto merania sa ukázali isté úskalia tohto softwaru, napr. väčšie odchýlky merania v určitých polohách tagu, pričom najväčšia odchýlka bola 1,3085 m a najmenšia 0,0201 m vzhľadom k vzdialenosti zmeranej pomocou laserového merača. Z grafov pre jednotlivé osy je zjavná určitá pohyblivosť hodnôt počas nahrávania záznamu, pričom nahrávanie prebiehalo v čase, kedy bol tag v kľude. Napriek tomu bola smerodajná odchýlka v priemere okolo 0,03 m.

Výsledky merania viedli k preskúmaniu, akým spôsobom prebieha komunikácia medzi jednotkami TREK1000 a akým spôsobom sa tag lokalizuje. Bol popísaný komunikačný protokol TREK1000 a na základe toho vytvorená objektová knižnica v jazyku C# pre komunikáciu s týmto zariadením použitím virtuálneho COM portu. Dáta z tejto knižnice boli následne použité v druhej knižnici, ktorá bola vytvorená za účelom výpočtu polohy tagu metódou trilaterácie.

Napriek tomu, že epidemiologická situácia sa za posledný mesiac zlepšila a došlo k výraznému rozvoľneniu opatrení, bol po celý rok prístup do školy zložitý a po dohode s vedúcim boli pre otestovanie funkčnosti využité dáta z prvotného merania. Funkcia knižnice pre trilateráciu bola otestovaná pomocou testovacieho súboru, v ktorom boli porovnané výsledky výpočtu pozície tagu zaznamenané programom DecaRangeRTLS a výsledky vypočítané pomocou kódu novo vytvorenej knižnice. Výsledná pozícia bola zhodná s výstupnou pozíciou z programu DecaRangeRTLS a preto bol test úspešný.

Na záver bola táto knižnica doplnená o vylepšujúce algoritmy, v ktorých bola použitá metóda váhovej trilaterácie. Test tejto metódy ukázal, že výpočet polohy tagu pomocou novej metódy má lepšie výsledky vzhľadom k pôvodnej metóde, keďže umožňuje vypočítať polohu tagu aj v prípade, keď sa sféry pretínajú v oblasti možných polôh.

Avšak, uvedený spôsob riešenia daného problému nie je najideálnejší, keďže rieši iba jeden konkrétny prípad vzájomnej polohy sfér. Ponúka sa celá škála riešení, ktoré v tejto práci neboli uskutočnené. Možnosťou by bolo použiť celkom iný algoritmus výpočtu polohy, než pôvodný, ktorý by lokalizoval tag s väčšou presnosťou, prípadne by mohla byť pridaná ďalšia metóda, ktorá by umožňovala výber algoritmu v závislosti na aktuálnej vzájomnej polohe sfér.

LITERATÚRA

- [1] NIKOOKAR, Homayoun a Ramjee PRASAD. *Introduction to ultra wideband for wireless communications*. Dordrecht: Springer Science + Business Media B.V., 2009. ISBN isbn:978-1-4020-6632-0.
- [2] FIALA, Zdeněk. *UWB signály pro měření vzdáleností a určování polohy* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-10-18].
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/64750>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole. Vedoucí práce František Vejraška.
- [3] URBAN, František. Hon na dokonalé navigační systémy vo vnútri budov.*TOUCHIT* [online]. 10/2017 [cit. 2019-10-18] Dostupné z: <https://touchit.sk/hon-na-dokonale-navigacne-systemy-vo-vnutri-budov/145747>
- [4] BLÁHA, Richard. *Systém pro personální lokalizaci* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65219>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra Kybernetiky. Vedoucí práce Libor Přeučil.
- [5] Electronics-notes. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/ieee-802-15-4-wireless/basics-tutorial-primer.php>
- [6] CONNEL, Ciaran, 2015 What's the difference between Measuring Location by UWB, Wi-Fi and Bluetooth?, In: *Electronic Design* [online]. 6.2. [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-measuring-location-uw-b-wi-fi-and-bluetooth>
- [7] NTIA, National Telecommunications and Information Administration, *The Federal Communications Commission (FCC)*. In: *ntia.doc.gov* [online], [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <https://www.ntia.doc.gov/book-page/federal-communications-commission-fcc>
- [8] POKORNÝ, Kamil, 2021 Co je to UWB? Je škodlivější než Wi-Fi, Bluetooth i NFC?, In: *elektrosmog-zony* [online]. [cit. 2019-10-18] Dostupné z: https://www.elektrosmog-zony.cz/download/uwb_princip_a_rizika.pdf
- [9] KASAL, Miroslav. Směrové a družicové spoje: přednášky. Vyd. 2. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2003. ISBN isbn80-214-2496-6
- [10] ŠEBESTA, Jiří. Radioniokační a radionavigační systémy, *Laboratorní cvičení - UWB lokalizace*, Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [11] KRIPEL, Martin, *Návrh systému pro precizní lokalizační služby* [online], Brno, 2016, [cit. 2019-10-18] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=132462. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav informačních systémů. Vedoucí práce Vladimír Veselý.

- [12] DecaWave, *About Us: The Micro-location Company* [online]. [cit. 2019-11-28]
Dostupné z: <https://www.decawave.com/product/trek1000-evaluation-kit/>
- [13] DecaWave, *Products: EVK1000 Evaluation Kit* [online]. [cit. 2019-11-28]
Dostupné z: <https://www.decawave.com/product/trek1000-evaluation-kit/>
- [14] STMicroelectronics, [online katalogový list] *STM32F105xx/ STM32F107xx* [cit. 2019-11-28] Dostupné z:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00220364.pdf>
- [15] DecaWave, *DecaRangeRTLS_ARM_Source_Code_Guide*. © 2015 [cit. 2019-11-28] Dostupné z: <https://decaforum.decawave.com>
- [16] GeeksforGeeks, *Introduction to Visual Studio* 2019 [online] [cit. 2019-11-28]
Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-visual-studio/>
- [17] BOUBEZ, Inge, 2019. Ultimate 2019 Real Time Location System (RTLS) Tech Guide. In: *Realtimenetworks.com* [online]. 29.5. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/novaiso690/priklady-harvardsky-system-jmeno-datum/elektronicke-zdroje-harvardsky-system>
- [18] CANTÓN PATERNA, Vicente, Anna CALVERAS AUGÉ, Josep PARADELLS ASPAS a María PÉREZ BULLONES. A Bluetooth Low Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. *Sensors* [online]. 2017, 17(12) [cit. 2021-04-03]. DOI: 10.3390/s17122927. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2927>
- [19] Game Development, 2014. Sphere – Sphere intersection and Circle – Sphere intersection. In: *gamedev.stackexchange.com* [online]. 28.5. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: https://gamedev.stackexchange.com/questions/75756/sphere-sphere-intersection-and-circle-sphere-intersection?fbclid=IwAR2TWbKDKGon1LG18-1d-kSpA2m5Gq5LIM3rI9O4_AOAEG_giUVc6HLRk9Q
- [20] AmBrSoft Calculators+, 2019. Two spheres intersection, In: *ambrsoft.com* [online]. 1.3. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <http://www.ambrsoft.com/TrigoCalc/Sphere/TwoSpheres/Intersection.htm>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

| | | |
|-----------|-----|---|
| FEKT | ... | Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií |
| VUT | ... | Vysoké učení technické v Brně |
| WLAN | ... | Wireless Local Area Network |
| UWB | ... | Ultra – WideBand |
| GPS | ... | Global Positioning System |
| COM port | ... | Communication port |
| WPAN | ... | Wireless Personal Area Network |
| OSI model | ... | Open Systems Interconnection model |
| MAC | ... | Medium access control |
| PHY | ... | Physical layers |
| PPDU | ... | Physical Protocol Data Unit |
| SHR | ... | synchronization header |
| SFD | ... | start of frame delimiter |
| PHR | ... | PHY Header |
| PSDU | ... | Physical Service Data Unit |
| FCC | ... | Federal Communications Commission |
| IDE | ... | Integrated Development Enviroment |
| RTLS | ... | Real-time locating systems |
| USB | ... | Universal Serial Bus |
| IDE | ... | Integrated Development Enviroment |

Symboly:

| | | | |
|--------------|-----|--|-------|
| BW_{-10dB} | ... | absolútna šírka pásma pre pokles o 10 dB | [MHz] |
| f_{MAX} | ... | maximálna frekvencia pásma | [MHz] |
| f_{MIN} | ... | minimálna frekvencia pásma | [MHz] |
| f_c | ... | stredná frekvencia pásma | [MHz] |
| B_{rel} | ... | relatívna šírka pásma | [MHz] |

ZOZNAM PRÍLOH

| | |
|--|-----------|
| PRÍLOHA 1 – VYSVETLIVKY ZÁZNAMU Z PROGRAMU DECARANGERTLS..... | 54 |
| PRÍLOHA 2 – UKÁŽKA ZAZNAMENANÝCH DÁT PRI KOMUNIKÁCIÍ S TREK1000 PO OTVORENÍ COM PORTU | 55 |

Príloha 1 – Vysvetlivky záznamu z programu DecaRangeRTLS

- AP – Anchorposition, pozícia kotvy. Hodnoty majú nasledujúci význam:
AP: Anchor_ID: X: Y: Z
- RR – Range Report, záznam vzdialenosti. Hodnoty majú nasledujúci význam:
RR:TAG_ID:ANCHOR_ID:VZDIALENOST:OPRAVENA_VZDIALENOST:SEKVENCIA:PORADOVE_CIS_ZAZNAMU
- LE – LocationEstimate, odhad vzdialenosti. Hodnoty majú nasledujúci význam:
LE:TAG_ID:LE_COUNT:SEKVENCIA:[X,Y,Z]:
VZDIALENOST_OD_A0:VZDIALENOST_OD_A1:VZDILENOST_OD_A2:VZDIALENOST_OD_A3
- TS – Tag Statistic, štatistiky vyhodnocovania polohy. Hodnoty majú nasledujúci význam:
TS:TAG_ID avx:PRIEMER_Xavy:PRIEMER_Yavz:PRIEMER_Zr95:R95
- NL – No location, žiadne dáta pre určenie polohy.

Príloha 2 – Ukážka zaznamenaných dát pri komunikácii s TREK1000 po otvorení COM portu

```
mc 01 000004e7 00000000 00000000 00000000 0603 3d 00047313 a0:0
mr 01 00000415 00000000 00000000 00000000 0603 3d 40424042 a0:0
mc 01 0000055d 00000000 00000000 00000000 0604 3e 00047378 a0:0
mr 01 0000048b 00000000 00000000 00000000 0604 3e 40424042 a0:0
mc 01 00000566 00000000 00000000 00000000 0605 3f 000473db a0:0
mr 01 00000494 00000000 00000000 00000000 0605 3f 40424042 a0:0
mc 01 00000494 00000000 00000000 00000000 0606 40 00047440 a0:0
mr 01 000003b8 00000000 00000000 00000000 0606 40 40424042 a0:0
mc 01 000005a8 00000000 00000000 00000000 0607 41 000474a4 a0:0
mr 01 000004d6 00000000 00000000 00000000 0607 41 40424042 a0:0
mc 01 00000481 00000000 00000000 00000000 0608 42 00047507 a0:0
mr 01 000003a5 00000000 00000000 00000000 0608 42 40424042 a0:0
mc 01 00000457 00000000 00000000 00000000 0609 43 0004756c a0:0
mr 01 0000037b 00000000 00000000 00000000 0609 43 40424042 a0:0
mc 01 000004a2 00000000 00000000 00000000 060a 44 000475d0 a0:0
```